



LEITFADEN

Systematisch Energieeffizienz steigern und CO₂-Emissionen senken in der Glasindustrie

Branchenspezifische Lösungen

Inhalt

Vorwort Seite 3

01 Grundlagen und branchenspezifische Herausforderungen Seite 4

- 1.1 Vielfalt und Heterogenität der Branche
- 1.2 Verbrauchsstruktur der Glasindustrie
- 1.3 Typische Energieeffizienzpotenziale und Einsätze in den Prozessen
- 1.4 Energie- und klimapolitischer Rahmen

02 Systematische Ansätze Seite 10

- 2.1 Energie- und Umweltmanagement
- 2.2 CO₂-Emissionen und Benchmarks
- 2.3 Energieeffizienz durch Digitalisierung
- 2.4 Umweltgerechte Produktgestaltung
- 2.5 Einsatz erneuerbarer Energien

03 Prozesstechnologien in der Produktion Seite 24

- 3.1 Prozessschritte und Energieeffizienzpotenziale
- 3.2 Glasschmelzwannen
- 3.3 Sauerstoffverbrennung (Oxy-Fuel-Schmelze)
- 3.4 Hybride Schmelzwannen (Boosting)
- 3.5 Vollelektrische Glasschmelzwannen

04 Abwärme Seite 42

- 4.1 Abwärmenutzung Überblick
- 4.2 Verbrennungsluftvorwärmung
- 4.3 Gemenge- und Scherbenvorwärmung
- 4.4 Abwärmeverstromung
- 4.5 Außerbetriebliche Abwärmenutzung

05 Querschnittstechnologien Seite 48

- 5.1 Motoren und Antriebssysteme
- 5.2 Lüftungssysteme
- 5.3 Kälteerzeugung
- 5.4 Pumpensysteme
- 5.5 Druckluftsysteme
- 5.6 Beleuchtungssysteme

06 Finanzielle Förderung Seite 56

Literaturverzeichnis
Abkürzungen
Einheiten- und Indexverzeichnis
Impressum

Vorwort

„GLASINDUSTRIE AUF DEM WEG ZUR KLIMANEUTRALITÄT“



Der Aufbruch zur Klimaneutralität in Deutschland und Europa hat begonnen. Die damit verbundene Transformation der Industrie nimmt vor dem Hintergrund der aktuellen energiepolitischen Herausforderungen an Dringlichkeit deutlich zu. Bereits heute zeigen zahlreiche Unternehmen und Branchen, wie sie mit technischen Innovationen CO₂-Emissionen reduzieren und damit gleichzeitig ein zukunftsfähiges Geschäftsmodell aufbauen. So leisten sie nicht nur einen wertvollen Beitrag zur Energiewende, sie sind zugleich Vorbild und wichtiger Impulsgeber für den eigenen Wirtschaftsbereich.

Im Projekt „Leuchttürme CO₂-Einsparung in der Industrie“ zeigt die dena realisierbare Wege zur Energie- und CO₂-Reduktion in vier Schwerpunktbereichen mit hohen Einsparpotenzialen auf. Besondere Beachtung finden dabei die Förderprogramme des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), die den Unternehmen finanzielle Unterstützung bieten. Der vorliegende Leitfaden zeigt für die Glasindustrie mit ihrem hohen Energiebedarf konkrete Maßnahmen und Lösungen für eine klimaneutrale Produktion auf.

Andreas Kuhlmann
Vorsitzender der Geschäftsführung,
Deutsche Energie-Agentur



Die Glasindustrie gehört zu den energieintensiven Industrien. Energieeinsatz, Versorgungssicherheit und Energiekosten spielen hier eine zentrale Rolle. Bereits frühzeitig hat sie sich systematisch mit der Reduzierung des Energieeinsatzes beschäftigt, nennenswerte Energieeinsparpotenziale sind heute weitgehend ausgeschöpft. Eine weitere Reduzierung der CO₂-Emissionen hängt daher auch entscheidend von einer Umstellung auf erneuerbare Energieträger ab.

Der Bundesverband Glasindustrie e. V. (BV Glas) zeigt mit seiner Dekarbonisierungsstrategie, dass Klimaneutralität für die energiebedingten Emissionen der Glasindustrie im Jahr 2045 prinzipiell möglich ist. Dafür ist ein enormer Aufwand für Forschung, Anlagentechnik und Infrastruktur erforderlich. Für eine erfolgreiche Dekarbonisierung müssen auch die politischen Rahmenbedingungen stimmen, damit die Glasindustrie weiterhin wettbewerbsfähig am Standort Deutschland produzieren kann. Denn den Wechsel können wir nur gemeinsam schaffen!

Dr. Johann Overath
Hauptgeschäftsführer
Bundesverband Glasindustrie e. V.

01

GRUNDLAGEN UND BRANCHEN- SPEZIFISCHE HERAUSFORDER- RUNGEN

Die Glasindustrie in Deutschland ist geprägt von mittelständischen Unternehmen und vor allem im Fachglasbereich von einigen großen Konzernunternehmen. Im Jahr 2021 waren in der Glasindustrie rund 54.000 Erwerbstätige in 386 Unternehmen beschäftigt. Der Branchenumsatz lag bei 10,2 Milliarden Euro, die Exportquote bei 50,8 Prozent. Sie ist damit etwas niedriger als die des gesamten verarbeitenden Gewerbes.¹

Die Glasherstellung ist eine der energieintensivsten Industriezweige in Deutschland. Der Hauptteil des Energiebedarfs entfällt dabei auf den Prozess der Glasschmelze. Dieser kann bis zu 85 Prozent des Gesamtenergiebedarfs eines Unternehmens ausmachen. Nach Erhebungen aus dem Jahr 2020 gehen bei der Glasschmelze rund 84 Prozent der Treibhausgase (THG) auf den Einsatz

fossiler Brennstoffe zurück, überwiegend Erdgas. Zusätzlich entstehen im Schmelzprozess prozessbedingte CO₂-Emissionen, da Karbonate aus dem Gemenge zersetzt werden.²

In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten konnte die Energieeffizienz in der Glasindustrie kontinuierlich gesteigert werden. Vor dem Hintergrund des Pariser Klimaabkommens erhöhen sich jedoch die Anforderungen an ein klimaneutrales Wirtschaften auch für die Glasindustrie. In Pilotvorhaben wird daher bereits der erweiterte Einsatz von elektrischen Schmelzverfahren erprobt. Zusätzlich wird grüner Wasserstoff als CO₂-freier Energieträger für eine nachhaltige Glasproduktion immer interessanter.

1.1 Vielfalt und Heterogenität der Branche

Glas ist einer der vielfältigsten Werkstoffe und wird in unterschiedlichsten Branchen und zu verschiedensten Zwecken eingesetzt. Die Bandbreite reicht vom Verpackungsmaterial für Lebensmittel bis hin zum Baubereich. Mehrscheiben-Isoliergläser und wärmedämmende Glaswolle verbessern die Energiebilanz von Gebäuden und tragen zum Klimaschutz bei. Als Bestandteil von Solaranlagen macht Glas Sonnenenergie nutzbar. Hinzu kommen weitere Glasanwendungen wie Tafelglas, Glasfasern, Flachbildschirme oder pharmazeutische Behälter.

Die Glasindustrie kann in folgende Branchensegmente aufgeteilt werden: Flachglas, Hohlglas (Behälterglas, Kristall- und Wirtschaftsglas), Mineral- und Glasfasern sowie Gebrauchs- und Spezialglas (sonstige Gläser und technische Glaswaren). Der größte Umsatzanteil entfällt dabei auf die Flachglasveredelung, gefolgt von der Behälterglasindustrie und der Spezialglasherstellung (siehe Abbildung 1).

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich insbesondere auf die sowohl in Deutschland als auch in Europa dominierenden Wirtschaftsklassen der Flach- und Behälterglasherstellung.

Umsatzanteile

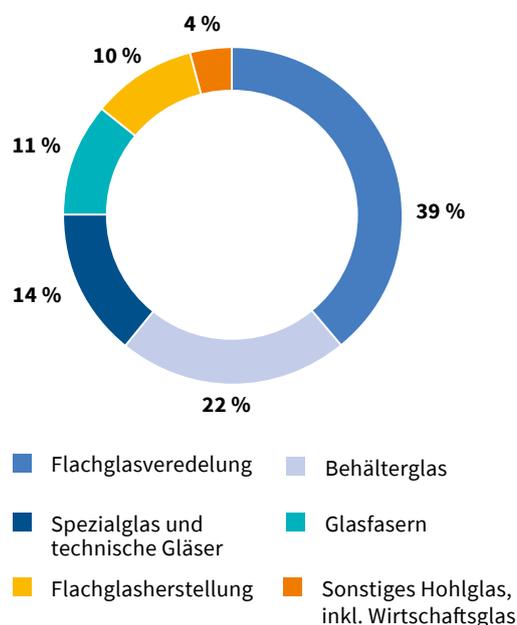


Abbildung 1: Umsatzanteile der Glasbranche. Quelle: eigene Darstellung auf Basis BV Glas Jahresbericht 2020

¹ BV Glas (2022)

² KEI (2022)

Endenergiemix

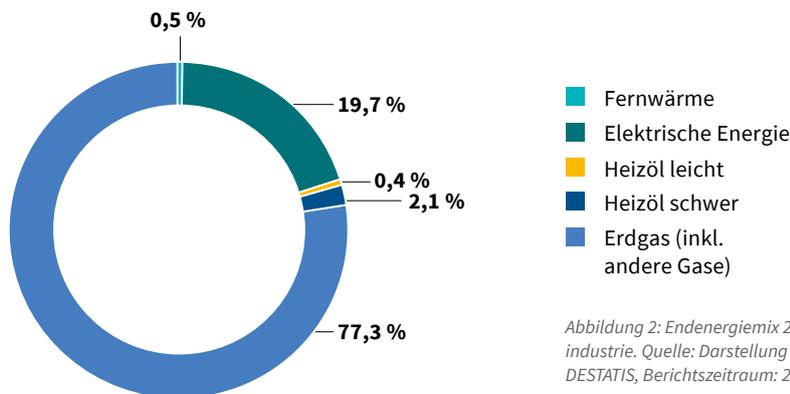


Abbildung 2: Endenergiemix 2020 in der Glasindustrie. Quelle: Darstellung BV Glas auf Basis DESTATIS, Berichtszeitraum: 2020

1.2 Verbrauchsstruktur der Glasindustrie

Im Jahr 2020 wurden durch die Glasindustrie insgesamt 13,6 TWh fossile Energieträger und 4 TWh Strom eingesetzt.³ Die erforderliche Prozesswärme für die Glasschmelze wird heute größtenteils durch den Einsatz von Erdgas bereitgestellt. Er macht durchschnittlich rund drei Viertel des Gesamtenergiebedarfs aus. Je nach Glasart und Produktionsverfahren kann der Anteil sogar bis zu 85 Prozent betragen. Zusätzlich werden rund 20 Prozent der Energie elektrisch bezogen, beispielsweise für elektrische Antriebe, für ein Zusatzheizen beim Schmelzprozess („Boosting“) oder

für elektrisch betriebene Schmelzwannen. In wenigen Fällen wird Prozesswärme durch den Einsatz von Heizöl bereitgestellt.⁴

Den Hauptteil des Energieverbrauchs bei der Glasherstellung erfordert der energieintensive Schmelzprozess. Anders als in der Formgebung spielt in der Weiterverarbeitung und Veredelung von Glas der Verbrauch elektrischer Energie eine wesentliche Rolle. Hier kommt dem Einsatz energieeffizienter Querschnittstechnologien eine zentralere Bedeutung zu.

1.3 Typische Energieeffizienzpotenziale und Einsätze in den Prozessen

Auch wenn sich die Produkte und die eingesetzten Produktionstechnologien in der Glasherstellung stark unterscheiden, gibt es auch viele Gemeinsamkeiten. Dies betrifft auch die in der nachfolgenden Grafik dargestellten typischen Prozessschritte.

Hinsichtlich Energieeffizienz und CO₂-Einsparung kommt der Glasschmelze als besonders energieintensivem Prozess eine herausragende Bedeutung zu. Eine Wärmerückgewinnung zur Vorwärmung der Verbrennungsluft ist hier ein bereits etablierter Standard. Trotz des technologischen Fortschritts ist es in den vergangenen Jahren nur noch im geringen Ausmaß

gelingen, den Energieverbrauch der Glasschmelze weiter signifikant zu senken. Daher besteht eine zentrale Herausforderung darin, die Energieeffizienz zu erhöhen und die CO₂-Emissionen des Schmelzvorgangs zu senken. Ausführungen zu der Effizienz von Schmelzwannen finden sich in [Kapitel 3](#).

Eine energetische Eigenerzeugung erfolgt bisher hauptsächlich in größeren Glasproduktionen, indem mit der Abwärme der heißen Abgase Dampf erzeugt und Turbinen zur Stromerzeugung angetrieben werden. Bedeutsame Ansätze für eine Abwärmenutzung finden sich in [Kapitel 4](#).

³ BV Glas auf Basis von Zahlen des Statistischen Bundesamtes

⁴ Leisin (2020), S. 2

Aber auch in den weiteren Prozessschritten, von der Aufbereitung der Rohstoffe bis zur Weiterverarbeitung der Gläser, können relevante Einsparpotenziale gefunden werden. Eine Übersicht zu energieeffizienten Querschnittstechnologien finden sich im [Kapitel 5](#).

Eine signifikante Verringerung der CO₂-Emissionen erfordert den Ersatz fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Energieträger. Der größte Teil der benötigten Wärmeenergie (89 Prozent) wird zur Bereitstellung bei Temperaturen oberhalb von 500 °C benötigt. Als erneuerbare Energien stehen hier insbesondere grüner Wasserstoff und grüner Strom im Fokus. Für den Einsatz von Wärmepumpen, Solarthermie oder Kraft-Wärme-Kopplung bestehen hingegen nur relativ geringe Potenziale.⁵ Eine Einordnung erneuerbarer Energieträger erfolgt im [Kapitel 2.5](#).

Neben den energiebedingten Emissionen entstehen rund 25 Prozent der Treibhausgas-Emissionen in der Flach- oder Behälterglasproduktion prozessbedingt.⁶ Ausgangs- und Zuschlagstoffe im Schmelzprozess wie Kalkstein, Dolomit und Soda verursachen ebenfalls CO₂-Emissionen. Hier können der Einsatz von klimaschonenderen oder recycelten Materialien sowie perspektivisch der Einsatz von CO₂-neutralen Fließmitteln Reduktionsmöglichkeiten bieten. Auch ein erhöhter Einsatz von Scherben wirkt sich positiv auf die Energie- und CO₂-Bilanzen der Produkte aus.

Große Einsparpotenziale finden sich zudem in der Produktentwicklung und Produktnutzung ([siehe Kapitel 2.4](#)). Hier können Glashersteller ihre Kunden bei der Produktentwicklung beraten und helfen, nachhaltige und klimaschonende Produkte zu vermarkten.



Abbildung 3: Prozessschritte in der Glasindustrie. Quelle: Leisin (2020), S. 4

1.4 Energie- und klimapolitischer Rahmen

Auf dem Weg zur Klimaneutralität

Die Europäische Union hat sich im Rahmen des „EU Green Deal“ zum Ziel gesetzt, bis 2030 den CO₂-Ausstoß um mindestens 55 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 zu senken und bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen.⁷ Am 14. Juli 2021 legte die Europäische Kommission im Rahmen ihres „Fit for 55“-Pakets eine umfassende Reihe von Rechtsvorschlüssen vor. Damit soll der European Green Deal umgesetzt und die Klimaschutzbemühungen der EU entscheidend forciert werden.

Die Klimapolitik der Bundesregierung orientiert sich maßgeblich an den Vereinbarungen der UN-Klimarahmenkonvention, die im Kyoto-Protokoll sowie im Pariser Klimaabkommen festgelegt sind.⁸

Deutschland strebt an, seine Treibhausgasemissionen bis 2030 im Vergleich zu 1990 um mindestens 65 Prozent zu senken und bis 2045 klimaneutral zu werden.⁹

Das Ziel der Klimaneutralität erfordert für die Glasindustrie eine Dekarbonisierung des gesamten Produktionsprozesses, da CO₂-Einsparungen in der Nutzungsphase der Glasprodukte sowie reine Effizienzsteigerungen bei der Produktion nicht mehr ausreichen.

Eine alternative Abscheidung und Einlagerung von CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS) ist in Deutschland gegenwärtig aus rechtlichen Gründen sowie aufgrund mangelnder Akzeptanz und des

⁵ Leisin (2019), S.3

⁶ Leisin (2019) S. 9

⁷ European Commission (2022)

⁸ EU-Kommission (2022)

⁹ BMUV (2022)

Fehlens einer entsprechenden Infrastruktur nicht möglich. Nach aktuellem Kenntnisstand wird CCS auch in Zukunft bestenfalls für Großemittenten eine wirtschaftliche Option sein. Daher werden Unternehmen der Glasindustrie darauf angewiesen sein, auch ihre Prozessemissionen so weit wie möglich durch die Verwendung geeigneter Rohstoffe und Verfahren zu mindern.

Der Europäische Emissionshandel (EU-ETS)

Im Jahr 2005 wurde der Europäische Emissionshandel (EU-ETS) eingeführt mit dem Ziel, die Treibhausgasemissionen von großen Kraftwerken und Industrieanlagen sowie aus dem Luftverkehr zu reduzieren. Im Jahr 2021 wurden innerhalb der Glasindustrie 75 Anlagen mit einer Feuerungsleistung von über 20 MW im EU-ETS erfasst, davon 68 Anlagen der Glasherstellung und 7 Anlagen der Mineralfaserherstellung.¹⁰

Durch den ETS wird entschieden, welche Menge alle Emittenten insgesamt auf Anlagenebene ausstoßen dürfen. Diese Obergrenze wird mit der Zeit verringert, sodass die Gesamtemission sinkt. Innerhalb der Obergrenze erhalten die Anlagenbetreiber Emissionszertifikate, mit denen sie handeln können. Damit ist CO₂ zu einem Wirtschaftsfaktor geworden. Seit 2022 wird das Recht, 1 Tonne CO₂ zu emittieren, mit über 80 Euro gehandelt.¹¹

Spätestens mit den eingeführten Benchmark-Verschärfungen für kostenlose Zuteilungen in der vierten Handelsperiode (2021–2030) müssen auch die Unternehmen der Glasindustrie zusätzliche Emissionszertifikate erwerben, sofern es nicht gelingt, durch Maßnahmen die Emissionen spürbar zu senken. Der Ausstattungsgrad aller Anlagen zur Herstellung von Glas und Mineralfasern betrug 2021 rund 74 Prozent. Der aggregierte Zukaufbedarf aller Anlagen liegt bei rund 1,1 Millionen Emissionsberechtigungen.¹²

Tipp: Eine Übersicht zu der Ausstattung einzelner Sektoren im Emissionshandel findet sich in der [Publikation „Treibhausgasemissionen 2021“](#) der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt).¹³



Der Nationale Emissionshandel (BEHG)

Das im Jahr 2021 in Kraft getretene nationale Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) verfolgt das Ziel, zusätzliche finanzielle Anreize für die Treibhausgasemissionen in den Sektoren Wärme und Verkehr zu setzen. In den nationalen Emissionshandel werden alle Brennstoffe des Energiesteuergesetzes einbezogen.¹⁴ Das deutsche BEHG bepreist die Emissionen der Glasindustrie, die nicht vom EU-ETS erfasst sind. Der nationale Emissionshandel ist mit einer Festpreisphase gestartet (2021–2026), die anschließend in einen Preiskorridor mit CO₂-Preisen zwischen 55 und 65 Euro pro Tonne übergehen soll. Damit erhöhen sich bis zum Jahr 2026 die Kosten für Heizöl (leicht) und Diesel um 16,8 ct/l, bei Erdgas um 1,3 ct/kWh.

¹⁰ DEHSt (2021), S. 53

¹¹ Quelle: EEX, Emissionspreise für Mid-Dec Carbon Futures im EU-ETS

¹² DEHSt (2021), S. 54

¹³ DEHSt (2021), S. 72

¹⁴ DEHSt (2022)



Freiwillige CO₂-Kompensation

Treibhausgasemissionen, die sich nicht vermeiden oder reduzieren lassen, können durch Klimaschutzprojekte kompensiert werden. CO₂-Kompensationen bieten auch Unternehmen der Glasindustrie die Möglichkeit, dem Wunsch nach klimaschonenden oder klimaneutralen Produkten zu entsprechen.

In den vergangenen Jahren haben sich vermehrt internationale Standards auf dem Markt für freiwillige Kompensation etabliert, die einen Großteil des Marktes abdecken. Hierzu zählen der Clean Development Mechanism (CDM), der Verified Carbon Standard (VCS) oder der Gold Standard. Kompensationsprojekte stehen häufig aber auch in der Kritik. Grundsätzlich sollten Maßnahmen der CO₂-Vermeidung gegenüber einer Kompensation bevorzugt werden.

Tipp: Weitere Informationen zur CO₂-Kompensation und zu den wichtigsten Qualitätsstandards in Deutschland finden sich im Ratgeber des Umweltbundesamts (UBA) [„Freiwillige CO₂-Kompensation durch Klimaschutzprojekte“](#).¹⁵



¹⁵ UBA (2018)

02

SYSTEMATISCHE ANSÄTZE

2.1 Energie- und Umweltmanagement

Die meisten Glashersteller haben aufgrund der wirtschaftlichen Bedeutung der Energiekosten und bestehender steuerlicher Anreizsysteme bereits ein zertifiziertes Energiemanagementsystem (EnMS) nach DIN EN ISO 50001:2018 etabliert. Ziel hierbei ist es, Energieverbräuche und -kosten in einem Betrieb systematisch zu erfassen sowie die energiebezogene Leistung (Energieeffizienz, -einsatz und -verbrauch) kontinuierlich zu verbessern, um Energiekosten und CO₂-Emissionen nachhaltig zu senken.

Mit der Zertifizierung des EnMS verpflichten sich Unternehmen, die energiebezogene Leistung ihrer wesentlichen Energieverbraucher (Significant Energy Use, SEU) kontinuierlich zu verbessern. Hierfür sind valide Energieleistungskennzahlen (Energy Performance Indicators, EnPI) nötig, mit denen diese Leistung gemessen werden kann. Die DIN EN ISO 50006:2017 kann dabei als Leitfaden zur Bildung, Nutzung und Anpassung der EnPI und der energetischen Ausgangsbasen (Energy Baselines, EnB) genutzt werden.¹⁶

In den Geschäfts- oder Nachhaltigkeitsberichten von Glasherstellern wird häufig nur der spezifische Energieverbrauch pro Tonnage produziertes Glas veröffentlicht. Ein praxisorientiertes Benchmarking der Energieeffizienz individueller Prozesse und Systeme in der Glasherstellung ist aufgrund der mangelnden öffentlichen Verfügbarkeit entsprechender Daten bisher nur eingeschränkt möglich.

In dem Projekt „Energiewende in der Industrie“ wurden die in Tabelle 1 dargestellten spezifischen Energieverbräuche der Glasproduktion ermittelt. Die Werte für Flachglas sind in der Regel höher als die Werte für Behälterglas. Die Gründe hierfür liegen in der höheren Qualität des Flachglases und damit verbunden einem längeren Läuterungsprozess sowie höheren Wärmeverlust.

Produkt	Teilprozess	Strom (GJ/t Glas)	Brennstoffe (GJ/t Glas)	Gesamt (GJ/t Glas)
Behälterglas		1,4	5,8	7,2
	Schmelze	0,5	4,9	5,4
	Sonstiges	0,9	0,9	1,8
Flachglas		3,3	9,3	12,6
	Schmelze	0,7	7,9	7,7
	Sonstiges	2,6	1,4	2,8

Tabelle 1: Spezifischer Energieverbrauch pro Tonne verkaufsfähiges Glas sowie Gesamtenergieverbrauch.
Quelle: Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE (2021), S. 25

¹⁶ siehe dazu auch WEKA (2022)

Für die energetische Optimierung der Glasproduktion und eine Vergleichbarkeit mit anderen Angaben bildet die Entwicklung von aussagekräftigen EnPI eine zentrale Herausforderung. Dabei ist zwischen den Bezugsgrößen (geschmolzenes oder verkaufsfähiges Glas) sowie dem Primärenergieeinsatz und Endenergieverbrauch zu unterscheiden und die Bilanzgrenze klar auszuweisen (z. B. Schmelzwanne, Linie, Werk). Die Energieeffizienz ausgewählter Prozesstechnologien wird in [Kapitel 3](#) näher betrachtet.

Bei der Entwicklung von EnPI müssen zunächst alle Prozesse, in denen Energie eingesetzt wird, erfasst werden. Anschließend können die Großverbraucher (SEU) definiert und einer verantwortlichen Person zugeordnet werden. Die EnPI werden für die Großverbraucher auf variable und statische Einflussfaktoren wie die produzierte Menge oder die Außentemperatur untersucht. Sind die wesentlichen Variablen bestimmt, kann als nächster Schritt zum Beispiel mithilfe einer Regressionsanalyse der Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch und den jeweiligen Variablen hergestellt werden.

Tipp: Eine Liste förderfähiger Softwarelösungen zur Implementierung, Aufrechterhaltung und Verbesserung eines Energiemanagementsystems gemäß DIN EN ISO 50001:2018 findet sich auf der [Website des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle \(BAFA\)](#).

Für die Zertifizierung des EnMS nach DIN EN ISO 50001:2018 ist eine geeignete Dokumentation notwendig. Eine Liste der verpflichtenden Informationen ist im Leitfaden des [Umweltbundesamts „Energiemanagementsysteme in der Praxis“](#) zu finden.¹⁷

Vom Energie- zum Klimamanagement

Ein etabliertes EnMS bildet auch eine gute Grundlage zur Einführung eines systematischen Klimamanagements, da wichtige Energiekennzahlen nun bereitstehen und die Strukturen eines Managementsystems bereits in der Geschäftsführung sowie im operativen Betrieb verankert sind. Einige Glasbetriebe haben mit der Entwicklung einer Strategie und der operativen Implementierung eines Klimaschutzmanagementsystems begonnen. Bei der Treibhausgasbilanzierung kann auf etablierte Standards zurückgegriffen werden (siehe Tabelle 2).

Norm	Inhalt
ISO 14064-1	Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene
ISO 14064-2	Bestimmung, Überwachung und Berichterstattung von Reduktionen der Treibhausgasemissionen oder Steigerungen des Entzugs von Treibhausgasen auf Projektebene
ISO 14067	Berechnung des Carbon Footprint von Produkten (PCF)
GHG Protocol	Methodenstandard zur Treibhausgasbilanzierung

Tabelle 2: Anerkannte Standards für die Erfassung von Treibhausgasemissionen auf Unternehmens-, Produkt- oder Projektebene. Quelle: dena

An der Börse gelistete und große Unternehmen sind durch das [CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz \(CSR-RUG\)](#) von einer gesetzlichen Pflicht zur nicht-finanziellen Berichterstattung betroffen und müssen THG-bezogene Kennzahlen veröffentlichen.



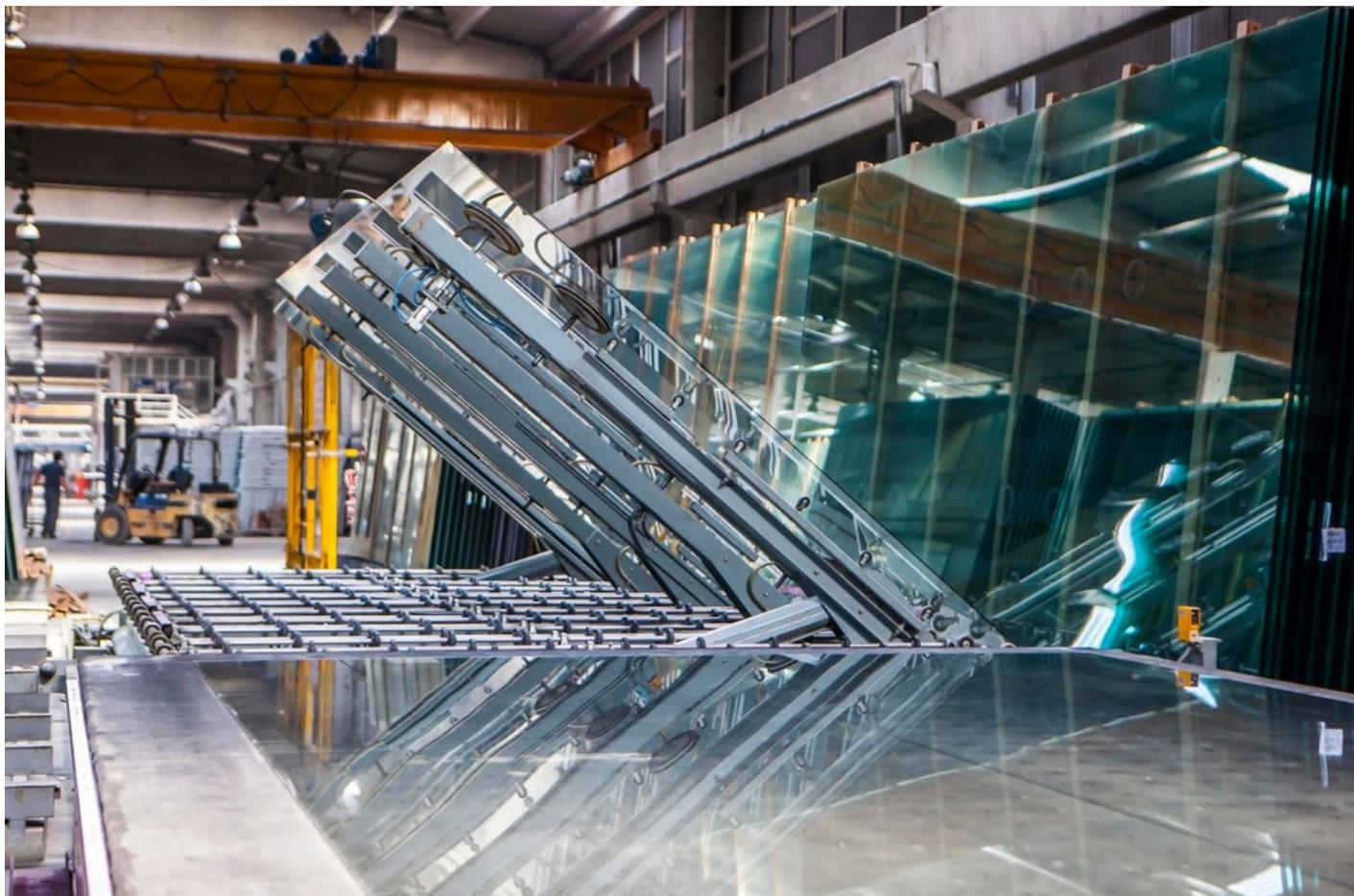
¹⁷ UBA (Dezember 2019, aktualisierte Version vom 30.03.2020)

Tipp: Weitere Informationen zur Nachhaltigkeitsberichterstattung finden sich auf der [Website zum Deutschen Nachhaltigkeitskodex](#).

Steigende Energie- und CO₂-Preise, eine wachsende Nachfrage nach klimarelevanten Daten vonseiten der Kunden, die große Beliebtheit klimabezogener Label auf Endprodukten sowie stetige Ausweitungen der Berichtspflichten sind auch für kleine und mittlere Unternehmen zentrale Argumente, ein systematisches Klimamanagement im Betrieb zu verankern und voranzutreiben.

Tipp: Durch eine Beteiligung an der „Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke“ können durch den moderierten Informationsaustausch mit anderen Unternehmen wertvolle Kenntnisse über technologische Entwicklungen und Erfahrungen bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen gewonnen werden. Der BV Glas engagiert sich in dieser Initiative, ist Netzwerkträger von drei Netzwerken und moderiert darüber hinaus das Netzwerk GlasNET (GlasNET, GlasNET2.0, GlasNET3.0).

Zum Aufbau eines systematischen Klimamanagementsystems steht der Leitfaden „Vom Energiemanagement zum Klimamanagement“ von DENEFF, GUTcert, und Ökotec kostenfrei zur Verfügung.¹⁸



¹⁸ DENEFF (2020)

2.2 CO₂-Emissionen und Benchmarks

Der Brennstoffverbrauch führt über den Emissionsfaktor des eingesetzten Brennstoffs (z. B. bei Erdgas 0,2 kg CO₂/kWh) zu energiebedingten Emissionen.¹⁹ Für eine ganzheitliche Erfassung müssen die prozessbedingten Emissionen und abhängig vom Bilanzkreis auch vorgelagerte Ketten hinzugezählt werden.

Die CO₂-Grenzwerte des Europäischen Emissionshandels (ETS) beziehen sich auf die direkten Gesamtemissionen des Herstellungsprozesses. Eine Erhebung im Rahmen der vierten Phase zeigt eine Übersicht über die spezifischen Emissionen der Glasindustrie, differenziert nach den wesentlichen Glaskategorien. Die Werte beziehen sich dabei auf verpacktes Glas (nicht auf die geschmolzene Glasmenge). Produktionseffizienz und Qualitätsanforderungen haben hier also einen Einfluss auf die ermittelten CO₂-Werte.

Abbildung 5 zeigt die ermittelte CO₂-Emissionsintensität der europäischen Behälterglasproduktion für gefärbte Gläser auf. Die Anlagen mit der besten heute etablierten Ofentechnologie sind zuerst (von links) aufgeführt und dienen der Festlegung der ETS-Benchmarks für die Zuteilung an Emissionsrechten. Sie liegen nahe dem theoretischen Grenzwert eines gasbefeuerten Ofens mit hohem Scherbenanteil. Ein großer Teil der Anlagen zeigt eine relativ hohe Effizienz in der Nähe der Bestwerte. Bei etwa 20 Prozent der Restanlagen bestehen hingegen signifikante Abweichungen. Wesentliche Einflussfaktoren für die Unterschiede sind:

- Ofenbauart und Anlagengröße
- Brennstoff
- Elektrische Zusatzheizung (nicht im ETS erfasst)
- Effizienz des Verbrennungssystems
- Scherbeneinsatz
- Zusammensetzung der Rohstoffe
- Produkt- und Qualitätsanforderungen
- Produktionsausschuss

Treibhausgasemissionen Behälterglas (gefärbt)

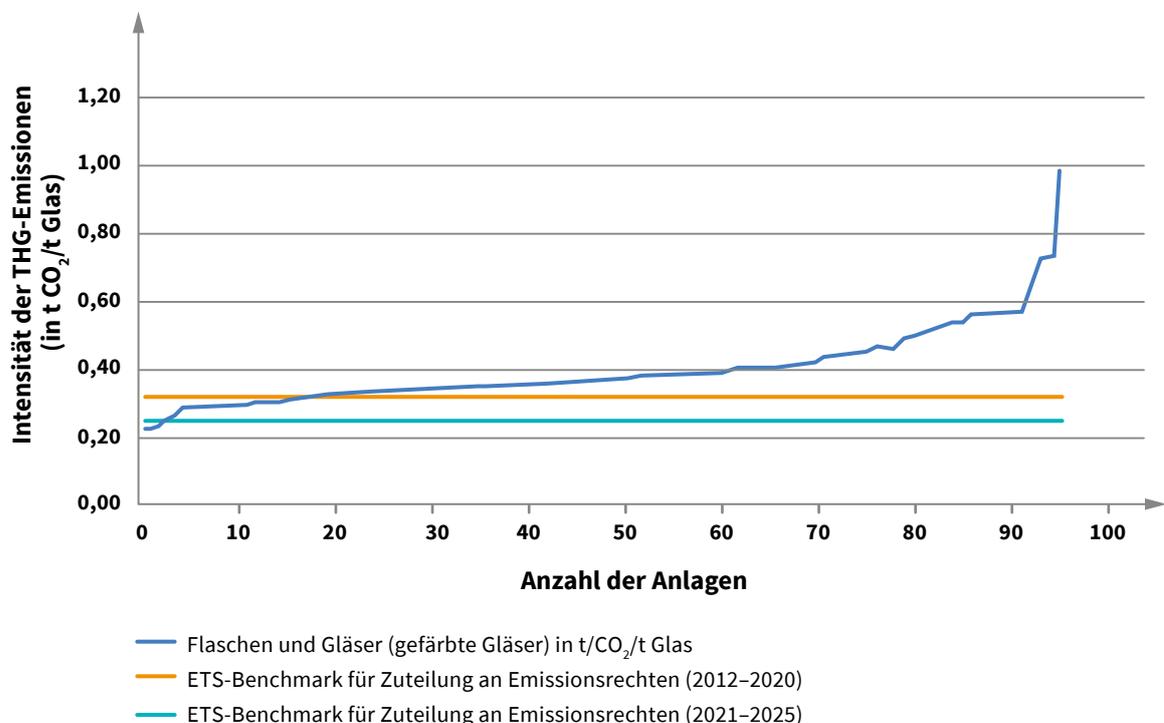


Abbildung 5: Treibhausgasemissionen europäischer Anlagen für Behälterglasproduktion. Quelle: European Commission (2021), S. 23

¹⁹ UBA (2016), S. 42

Tabelle 3 zeigt die für die ETS-Periode 2021 bis 2025 neu festgelegten Benchmarks für Treibhausgasemissionen (ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten) im Verhältnis zu den mittleren Emissionen der

wichtigen Glaskategorien aller Installationen in 2016/2017.²⁰ Die spezifischen Emissionen beziehen sich allgemein auf verkaufsfähiges Glas, bei Flachglas auf geschmolzenes Glas.

Glassorte	Wannentyp	Mittlere CO ₂ -Emissionen	Benchmark ETS
Floatglas	Querflammen-Regenerator	514 kg CO ₂ e/t	399 kg CO ₂ e/t
Behälterglas weiß*	U-Flammen-Regenerator	481 kg CO ₂ e/t	290 kg CO ₂ e/t
Behälterglas gefärbt	U-Flammen-Regenerator	391 kg CO ₂ e/t	237 kg CO ₂ e/t
Glasfasern		492 kg CO ₂ e/t	309 kg CO ₂ e/t

* Behälterglas mit Kapazitäten über 20 tpd (tons per day – Tonnen pro Tag)

Tabelle 3: Spezifische CO₂-Emissionen von Glasschmelzwannen, bezogen auf verkaufsfähiges Glas

2.3 Energieeffizienz durch Digitalisierung

Eine Energiemanagementsoftware hilft, die intelligente Steuerung und Regelung von Anlagen zu gewährleisten (siehe Kapitel 2.1). Notwendig hierfür ist eine entsprechende Prozessüberwachung.

Die Identifizierung von Energieeffizienzpotenzialen setzt eine ausreichende Datenverfügbarkeit voraus. Die Datenerfassung in Schmelz-, Form-

gebungs- und Abkühlprozessen kann hierbei in unterschiedlicher Granularität erfolgen.

Bei vielen automatisierten Prozessen werden noch isolierte Lösungen eingesetzt, bei denen keine Verknüpfung von der Feldebene über die Prozess- bis in die Unternehmensebene besteht. Eine Verknüpfung dieser Daten ermöglicht eine



Abbildung 6: Digitalisierung in der Glasindustrie. Quelle: Grenzebach Maschinenbau GmbH

²⁰ Quelle: European Commission (2021), S. 23

bessere Transparenz hinsichtlich relevanter Energie- und Medienverbrauchswerte, ihrer Kosten sowie der CO₂-Emissionen auf verschiedenen Aggregationsebenen.

Digitalisierung und IT helfen, den sensorischen Aufwand von Messkonzepten sowie zur Auswertung von Daten zu reduzieren und die Transparenz in Bezug auf den energetischen Zustand von Anlagen und Prozessen zu verbessern. So kann beispielsweise durch eine Kombination der Ziehgeschwindigkeit des Kühlkanals mit der Dicke und Breite des Glasbandes die Tonnage genau berechnet werden.

Die verwendeten Algorithmen ermöglichen eine automatisierte Bewertung der Energieeffizienz und eine darauf aufbauende optimierte Steuerung und Regelung. Auch vereinfacht die digitale Repräsentanz einer Anlage die Durchführung von Simulationen. Damit können Anlagen bereits im Entwurf energetisch optimal konstruiert und Ausfälle sowie Fehler im Betrieb frühzeitig vorausgesagt werden. Folgende

Ansätze zur Energieeffizienz durch Digitalisierung können genutzt werden:

- Intelligente Bildverarbeitung zur Erfassung der Prozesse im Inneren der Wannen mit hochauflösenden Kameras
- Dickenmessung im heißen Bereich und zweiseitige Temperaturmessung sowie Messung der Breite des Glasbandes
- Maschinelles Lernen, neuronale Netze zur Bestimmung von Ausfallwahrscheinlichkeiten, Betriebsoptimierung von Versorgungsanlagen
- Simulationen mittels digitaler Zwillinge im Anlagendesign und Betrieb

Für die Entscheidung zum Aufbau oder zur Erweiterung von Digitalisierungslösungen sind die bereits vorhandene IT-Infrastruktur sowie bestehendes Know-how im Unternehmen zu berücksichtigen.

2.4 Umweltgerechte Produktgestaltung

Nicht nur das Management energetischer und ökologischer Aspekte lässt sich im Unternehmen strategisch betreiben, auch in das Produktdesign können diese Faktoren integriert werden. Umweltgerechte Produktgestaltung – auch Ökodesign genannt – befasst sich mit der Verringerung der Umweltauswirkungen eines Produkts über dessen gesamten Lebensweg. Dies bedeutet zunächst, dass bei der Gestaltung die Erfüllung der bestehenden Anforderungen, wie beispielsweise Funktionalität und Sicherheit, unter dem Aspekt der Umweltrelevanz optimiert wird.

Vor dem Hintergrund steigender Energie- und Rohstoffpreise sowie des angestrebten Ziels der Klimaneutralität müssen im Sinne der Effizienz sämtliche Stoffströme und Verarbeitungsprozesse überdacht werden. Wesentliche Stellschrauben liegen hierbei im Produktdesign, um Produkte, Systeme, Infrastrukturen und Dienstleistungen über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg nachhaltig zu gestalten. In der Glasindustrie kann das Ökodesign von Produkten etwa durch Veränderungen von Wandstärken, Formgebung und Glasfarbe sowie durch den verstärkten Einsatz von Recyclingscherben optimiert werden.

Häufig ist der Werkstoff Glas Bestandteil eines Gesamtprodukts und muss im Sinne einer ganzheitlichen Produktbewertung über alle Phasen des Lebenszyklus berücksichtigt werden. Da die Nachfrage nach klimaschonenden bzw. klimaneutralen Produkten zunimmt, steigen auch die Ansprüche an das Endprodukt hinsichtlich der Klimawirkung.

Dabei bietet die gezielte Vermarktung nachhaltiger Produkte gute Möglichkeiten, Investitionen in umweltschonende Produktionsverfahren über eine Wertsteigerung zu finanzieren.

Der Product Carbon Footprint (PCF) beschreibt die Klimawirkung eines einzelnen Produkts bzw. einer Dienstleistung und umfasst sämtliche Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Dabei wird der gesamte Lebensweg betrachtet.

- Scope 1: Direkte Emissionen aus unternehmenseigenen oder kontrollierten Quellen (Erdgas, Kraftstoff, Kältemittel und Emissionen aus der Verbrennung in eigenen oder kontrollierten Kesseln und Öfen sowie Emissionen aus dem Fuhrpark). Scope-1-Emissionen umfassen Prozess-emissionen, die bei industriellen Prozessen und bei der Herstellung vor Ort freigesetzt werden.
- Scope 2: Emissionen aus leitungsgebundenen Energien und Energiedienstleistungen (elektrische Energie, Dampf, Wärme, Kälte)
- Scope 3: Treibhausgasinventar für vor- und nachgelagerte Prozesse



Abbildung 7: Walzenbrecher für Flachglas-Laminatglas. Quelle: ZIPPE Industrieanlagen GmbH

Tipp: Verbreiteter Standard zur Erstellung von Treibhausgasbilanzen ist das GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol). Für die Berechnung von Emissionsbilanzen stehen eine Reihe von Tools zur Verfügung. Ein kostenloses, Excel-basiertes Tool für Scope 1 und 2 sowie ausgewählte Kategorien aus Scope 3 ist das [GHG Emissions Calculation Tool](#).

Einen wesentlichen Beitrag zur ökologischen Produktbewertung kann das Recycling leisten. Der Einsatz von Scherben in der Glasschmelze wirkt sich prozessbeschleunigend und energiesparend aus, denn die erforderlichen chemischen Prozesse für das Einschmelzen der Rohstoffe sind bereits abgeschlossen. So werden bei einer reinen Scherbensschmelze ca. 25 Prozent weniger Energie verbraucht als beim Einschmelzen von Rohstoffen.²¹

Auch der Anteil prozessbedingter Emissionen kann durch den Einsatz von Scherben herabgesetzt werden. Eine Studie der European Container Glass Federation (FEVE)²² zeigt, dass jede Tonne recyceltes Glas von der Wiege bis zur Wiege 670 kg CO₂ einspart (EU-Durchschnitt). Eine 10-prozentige Erhöhung des Scherbenanteils im Schmelzofen senkt den Energieverbrauch um durchschnittlich 3 Prozent und die CO₂-Emissionen um 5 Prozent.

Der eingesetzte Scherbenanteil in der Glasproduktion ist stark von den Produkten abhängig. Bei Behälterglas machen Scherben mittlerweile den Hauptbestandteil aus (Grünglas bis zu 95 Prozent, Braunglas 60 bis 80 Prozent, Weißglas 50 bis 60 Prozent). Im Verpackungsgesetz (VerpackG) ist ab 2022 sogar eine Recyclingquote von 90 Prozent festgelegt.²³ Bei dieser Recyclingquote handelt es sich allerdings um eine Verwertungsquote der auf den deutschen Markt gebrachten lizenzierten Glasverpackungen. Sie ist nicht mit der Scherben-einsatzquote in der Glasindustrie zu verwechseln und gilt nicht als Verpflichtung für die Glasindustrie bzw. Behälterglasindustrie. Trotzdem ist davon auszugehen, dass sich die Recyclingquote aus dem Verpackungsgesetz auch positiv auf die Scherben-einsatzquote in der Glasindustrie auswirkt.

Im Flachglasbereich hingegen werden wegen der hohen optischen Qualitätsanforderungen bislang nur Scherben aus der eigenen Produktion eingesetzt. Eine Steigerung des Scherbenanteils setzt eine hinreichende Verfügbarkeit von qualitativen, sauberen Scherben voraus. Mögliche Lösungsansätze liegen in der Erweiterung der eigenen Wertschöpfungskette, der Entwicklung eigener Sammel- und Rücknahmesysteme oder der Anpassung des Produktdesigns.

Bei einer reinen Scherbenschmelze wird

25%

weniger Energie verbraucht als beim Einschmelzen von Rohstoffen.

²¹ Schaeffer (2020), S. 153 ff.

²² European Container Glass Federation (FEVE) (2016)

²³ UBA (2013)

Eine weitere Möglichkeit, den Carbon Footprint von Glasprodukten entscheidend zu verbessern, sind Mehrwegsysteme. So können Verpackungsgläser im Mehrwegsystem bis zu 50-mal wieder befüllt werden, bevor sie als Altglas in den Produktionskreislauf zurückfließen.²⁴ Glas-Mehrwegflaschen verursachen über den gesamten Lebenszyklus betrachtet weniger als 50 Prozent der Emissionen von Einwegflaschen.²⁵ Der Umweltvorteil von Mehrwegverpackungen kann durch Gewichtsreduzierungen, kurze Transportwege, energieeffiziente Wasch- und Abfüllanlagen sowie die Logistik entscheidend beeinflusst werden.

Tipp: Die Europäische Kommission hat im Februar 2021 mit der Ökodesign-Richtlinie produktgruppenspezifische Mindestanforderungen für ein systematisches Ökodesign formuliert. Die Richtlinie hat die Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Produkten entlang ihres gesamten Lebenswegs zum Ziel.

2.5 Einsatz erneuerbarer Energien

Da die Reduktion der Energieverbräuche durch Effizienzsteigerungen an technische und physikalische Grenzen stößt, müssen zukünftig klimaschonendere Energieträger zum Einsatz kommen. Die Umstellung fossiler Brennstoffe auf erneuerbare Alternativen betrifft den Kernprozess der Glasmelze und ist eine zentrale Herausforderung für die Glasindustrie.

In zahlreichen Forschungs- und Pilotvorhaben wird heute die Nutzung der Erneuerbaren erprobt und ihr Einfluss auf den Produktionsprozess untersucht. Hierzu zählen der Einsatz von (grünem) Strom, (grünem) Wasserstoff und gegebenenfalls Biogas/Biomethan als Energieträger. Synthetische Brennstoffe, Methanol, Ethanol oder Ammoniak spielen als mögliche Alternativen bislang eine untergeordnete Rolle.

Auch der Einsatz erneuerbarer Energien ist nicht immer frei von CO₂-Emissionen. Bei einer ganzheitlichen THG-Bilanzierung müssen auch der Transport und die Konvertierung berücksichtigt werden, genauso wie Vorkettenemissionen und die damit verbundenen Umwandlungsverluste.

Bei der Bewertung erneuerbarer Energien ist auf anerkannte Bewertungsmethoden zurückzugreifen, die sich jedoch in verschiedenen Regelwerken und auch bei den nationalen Staaten der EU-Gemeinschaft unterscheiden können (siehe Kapitel 2.1). Eine zentrale Richtlinie bildet die überarbeitete Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Renewable Energy Directive, RED II). Mit ihr wird bei Biomasse die gesamte Wertschöpfungskette von der Erzeugung bis zur Verstromung betrachtet und zertifiziert.

²⁴ UBA (2013)

²⁵ Deutsche Umwelthilfe (2018)

Tipp: Die im Rahmen einer Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz anzusetzenden CO₂-Faktoren finden sich im Informationsblatt CO₂-Faktoren des BAFA. Besonderer Hinweis: Im Rahmen der Förderung kann der Bezug von grünem Strom, Biodiesel, Biogas, Bioethanol etc. durch Lieferung nicht als Energieträgerwechsel geltend gemacht werden, da die CO₂-Einsparungen nicht auf dem Betriebsgelände des Antragstellers erzielt werden.²⁶



Zurzeit werden verschiedene Schmelzwannenkonzepte auf Basis erneuerbarer Energien erforscht und in ersten Pilotprojekten auf ihre Umsetzbarkeit hin getestet. Dabei handelt es sich häufig um signifikante Eingriffe in die Produktionstechnik, die sich auf die gesamte Konstruktion der Schmelzwanne auswirken. Zentrale Herausforderungen bilden hier die Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Energieträger, die Versorgungssicherheit sowie technische Risiken und die Kompatibilität mit gängigen Produktionsmethoden.

Im Vergleich zu Erdgas war bislang der Einsatz von erneuerbaren Energieträgern zur Glasschmelze nicht wirtschaftlich. Deutlich steigende Erdgaspreise und CO₂-Emissionsabgaben sowie Förderprogramme und Klimaschutzverträge (Carbon Contracts for Difference) können die Wirtschaftlichkeit jedoch deutlich erhöhen.

Grüner Strom

Der Emissionsfaktor für Strom ist in den letzten Jahren stark gesunken, weshalb Elektrifizierungslösungen in einer ganzheitlichen THG-Bilanz günstiger werden. Ursachen hierfür sind steigende Anteile von erneuerbaren Energien und Erdgas, der sinkende Anteil der Stromerzeugung aus Kohle sowie höhere elektrische Wirkungsgrade neuer Kraftwerke. Mögliche Auswirkungen der aktuellen geopolitischen Krise sind zu beobachten.

Die Erzeugung einer Kilowattstunde Strom verursachte im Jahr 2019 durchschnittlich 411 g CO₂ (ohne Vorkette). Für das Jahr 2020 hat das Umweltbundesamt auf Basis vorläufiger Daten einen „spezifischen Emissionsfaktor“ von 375 g/kWh eruiert. Nach aktuellen Berechnungen des UBA steigt der Emissionsfaktor für das Jahr 2021 auf 420 g/kWh an.²⁷ Als Ursache werden eine höhere Energienachfrage und eine geringere Erzeugung durch Erneuerbare genannt.

Da der sinkende CO₂-Faktor für Strom perspektivisch Stromeffizienzmaßnahmen weniger attraktiv macht, kann für diese Effizienzmaßnahmen im Rahmen der „Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft“ der doppelte CO₂-Faktor angesetzt werden (siehe Tabelle 4). Damit soll der Wichtigkeit dieser Maßnahmen Rechnung getragen werden. Die Anpassung der CO₂-Faktoren erfolgt halbjährlich auf Basis der neuesten verfügbaren Daten.

Anwendung	CO ₂ -Faktor
Strom (Effizienzmaßnahme)	0,732 t CO ₂ /MWh
Strom (Energieträgerwechsel zu Strom)	0,366 t CO ₂ /MWh

Tabelle 4: Emissionsfaktoren für Strom in der Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft. Quelle: BAFA (2021), S. 6

²⁶ BAFA (2021)

²⁷ UBA (2022a), S. 8

Neben dem Strombezug aus dem Netz der allgemeinen Versorgung bestehen die Möglichkeiten der Eigenstromerzeugung und einer langfristigen Direktstromlieferung (Power Purchase Agreement, PPA). Bei Green Power Purchase Agreements (Green PPA) handelt es sich um bilaterale Stromlieferverträge zwischen Produzenten von Strom auf Basis erneuerbarer Energien und Stromabnehmern. Die Stromlieferungen können dabei physisch oder bilanziell erfolgen. Durch die vertragliche Bindung sollen für alle Vertragspartner prognostizierbare stabile Preise und damit langfristige Planungssicherheit gewährleistet werden.

Tipp: Einen umfassenden Hinweis zu unterschiedlichen Beschaffungsstrategien für grünen Strom gibt der von der dena im Rahmen der Marktoffensive Erneuerbare Energien veröffentlichte [Leitfaden „Beschaffungsstrategien für grünen Strom“](#).²⁸

Die in anderen Industriebranchen übliche Eigenstromerzeugung auf Basis von Kraft-Wärme-Kopplung bietet sich bei der Glasherstellung aufgrund der benötigten hohen Schmelztemperaturen nicht an. Möglichkeiten der Eigenstromerzeugung bestehen jedoch in der Abwärmeverstromung sowie durch Photovoltaik-Anlagen, Windenergie oder Biomasse. So stellen große Dachflächen auch in der Glasproduktion eine Möglichkeit dar, mit der Installation eigener Photovoltaik-Anlagen zumindest einen Teil des Energiebedarfs zu decken.

Strom aus erneuerbaren Energien, sofern durch Abgaben und Umlagen nicht stark belastet, wird zunehmend wettbewerbsfähig und bis zum Jahr 2030 sollen 80 Prozent des Stroms in Deutschland aus erneuerbaren Energien stammen. Zum Vergleich: Im Jahr 2021 lag dieser Wert noch bei 42 Prozent. Perspektivisch sinken damit auch die Emissionen aus dem einfachen Strombezug aus dem Netz, die auch im Rahmen von Carbon Footprints ausgewiesen werden.

Eine umfassende Elektrifizierung der Produktion erfordert in der Regel auch eine Erhöhung der bestehenden Netzkapazität vor Ort.

Grüner Wasserstoff

Wasserstoff gilt als wichtiger Weg zur Dekarbonisierung von Industriesektoren. Der Einsatz von klimaschonendem (grünem) Wasserstoff zur Glasherstellung ermöglicht eine signifikante Reduzierung des Verbrauchs von fossilen Brennstoffen und der CO₂-Emissionen.

Voraussetzung für den Wasserstoffeinsatz ist eine ausreichende regionale Verfügbarkeit. In den kommenden Jahren wird mit einem weltweiten Aufbau von Erzeugungskapazitäten für die Herstellung von Wasserstoff gerechnet. Laut Berechnungen wird der Wasserstoffanteil am Energiemix der EU von aktuell unter 2 Prozent auf 13 bis 14 Prozent im Jahr 2050 ansteigen²⁹. Damit verbunden ist das Ziel, bis 2030 Elektrolyseure mit einer Leistung von mindestens 40 GW zu installieren.³⁰

Sogenannter grüner Wasserstoff erfordert den Einsatz von als erneuerbar anerkanntem Strom zur Elektrolyse. Die EU-Kommission arbeitet an Vorschriften³¹, in der Kriterien für eine Anerkennung von grünem Wasserstoff festgelegt werden.

Ein Vorteil für die erforderliche unterbrechungsfreie Energieversorgung besteht in der Speicherbarkeit des Energieträgers. Alternativ dazu ist der Einsatz von Wasserstoff als Zusatzverbrennung einer Hybridwanne möglich.³²

Neben der direkten energetischen Nutzung des Wasserstoffs besteht auch die Möglichkeit einer Verstromung mit Brennstoffzellen. Diese erreichen Wirkungsgrade von rund 60 Prozent, bei Nutzung der Abwärme sogar 90 Prozent. Damit kann Wasserstoff auch zur Absicherung elektrischer bzw. hybrider Glaswannen genutzt werden.

²⁸ dena (2022)

²⁹ European Commission (2020), S. 1

³⁰ BMU (2021), S. 22

³¹ Delegierter Rechtsakt zu Artikel 27 RED II

³² Weitere Informationen zum Einsatz von Wasserstoff bei Biebl et al. (2021), S. 52

Für Wasserstoff gibt es noch keinen einheitlichen Markt. Bisherige Veröffentlichungen beziffern Preise für grünen Wasserstoff mit 2,5 bis 5,5 €/kg.³³ Der Einsatz von Wasserstoff erfordert den Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur. Bei fehlenden Wasserstoffnetzen müssen Wasserstoffprojekte zunächst auf eine regionale Erzeugung setzen. Für den Umstieg der Industrie auf Wasserstoff werden spezifische Förderinstrumente zur Verfügung gestellt (siehe Kapitel 6).

Biomethan und Biogas

Eine Umstellung der Wannenfeuerung auf Biobrennstoffe und insbesondere auf Biomethan kann vor allem für Bestandsanlagen eine interessante Alternative zur kurzfristigen Reduzierung von CO₂-Emissionen darstellen. Je nach Ausgangsstoff können durch den Einsatz von Biomethan die CO₂-Emissionen im Vergleich zu Erdgas um bis zu 90 Prozent reduziert werden. Der Einsatz von nachhaltigem Biomethan wird im Rahmen des Emissionshandels (EU-ETS) mit null Emissionen gewertet.

Als Biomethan (Bioerdgas) wird Methan bezeichnet, das biogenen Ursprungs und Bestandteil von Biogas ist. Das aufbereitete Biomethan wird in das Erdgasnetz eingespeist und bilanziell gehandelt. Der Transport und der Verkauf des eingespeisten Biomethans können über Biogas- oder Erdgashandelsgesellschaften erfolgen. Es steht damit grundsätzlich überall dort zur Verfügung, wo ein Erdgasanschluss vorhanden ist. Der Einsatz von Biomethan ist für den Anwender physikalisch nicht von dem von Erdgas zu unterscheiden.

Die Nutzung von (aufbereitetem) Biogas in der Glasschmelze ist bisher nur in Teilen erforscht, erscheint aber anhand bisheriger Erfahrungen machbar. Für den Bezug von (Roh-)Biogas ist die Errichtung einer eigenen Mikrogasleitung zu einer erzeugenden Biogasanlage in der Nähe der Produktionsstätte erforderlich. Je nach eingesetztem Substrat schwankt der Biomethananteil bei Biogas zwischen 50 und 65 Prozent. Beim Einsatz von Biogas werden weitere Aufwendungen für die Vor- und Nachbehandlungen erforderlich. Beispielsweise muss das Biogas vor einer Nutzung von Schadstoffen befreit werden (Entschwefelung und Trocknung).

Derzeit werden in Deutschland jährlich ca. 10 TWh Biomethan erzeugt. Dem steht eine große Nachfrage durch die Energiewirtschaft und für den Einsatz als Kraftstoff gegenüber.³⁴ Auch der Aufbau eigener Erzeugungsanlagen oder der Abschluss langfristiger Lieferverträge können die Versorgung mit Biogas bzw. Biomethan sichern.

Die Großhandelspreise für Biomethan unterscheiden sich je nach eingesetztem Ausgangsstoff und Verwendungszweck. Mit Stand Januar 2022 lagen sie bei 64 bis 87 €/MWh, durch Sondereffekte sind auch signifikant höhere Preise möglich.³⁵

³³ European Commission (2020), S. 4

³⁴ dena (2019), S. 24

³⁵ dena (2021)



Energieträgerwechsel in Bestandsanlagen

Eine signifikante Senkung der Treibhausgasemissionen erfordert den Wechsel des Energieträgers von fossiler Energie hin zu erneuerbaren Energien. Dieser Energieträgerwechsel stellt einen erheblichen Eingriff in die Produktion und in die Gesamtkonzeption der Produktionsanlage dar. Dabei ist zu beachten, dass mit einer Umrüstung auch eine Verringerung der Produktionskapazität verbunden sein kann.

Vollständig kompatibel mit bestehender, auf Erdgas basierender Schmelztechnik ist nur der Einsatz von Biomethan, da dieser bilanziell gehandelte Brennstoff die gleichen verbrennungstechnischen Eigenschaften wie Erdgas aufweist. Aufgrund der langen Betriebszeiten von Glaswannen lässt sich durch Einsatz von Biomethan auch bei Bestandsanlagen eine kurzfristige Reduzierung der CO₂-Emissionen erreichen.³⁶

³⁶ Weiterführende Informationen unter www.biogaspartner.de

Der Einsatz von Wasserstoff oder von aufbereitetem Biogas ist zumindest teilweise mit bestehender Technik kompatibel. Die Umrüstung einer bestehenden Schmelzwanne kann zumindest theoretisch selbst bei laufendem Betrieb möglich sein. Allerdings muss auch hier das Anlagenkonzept mit umfangreichen Umbaumaßnahmen angepasst werden. Dies betrifft Verbrennungsdüsen, Querschnitte, Abgasbehandlung, Steuerung und Sicherheitstechnik.

Bisherige Untersuchungen bestätigen die grundsätzliche Einsatzmöglichkeit von Wasserstoff in Glasschmelzwannen.³⁷ Eine Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff in einem Regenerativofen scheint nach bisherigem Wissensstand mit entsprechenden Anpassungen der Ofentechnologie und Brennertechnik durchführbar. Herausforderungen bestehen jedoch in der höheren Verbrennungstemperatur von Wasserstoff und in erhöhten Stickoxidemissionen. Zu beachten sind dabei:

- Anpassung der Regeneratoren an die geänderte Rauchgaszusammensetzung
- Erhöhung der NaOH-Verdampfung von der Schmelze und erhöhtes Korrosionsrisiko für Oberofen und Regeneratoren
- Erhöhung der NO_x-Konzentrationen in den Luft-/Wasserstoff-Flammen durch erhöhte Temperaturen
- Anpassungen der Brennertechnologie
- Erhöhung des H₂O-Gehalts in der Glasschmelze

Eine mögliche Beimischung erneuerbarer Gase wie Wasserstoff oder Biogas ist in bestimmten Grenzen möglich, bedarf aber einer gesonderten Untersuchung. Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Glasqualität sind noch vertiefende Untersuchungen nötig. Einige Glashersteller und Entwicklungslabore haben bereits mit entsprechenden Technikums und Vorstudien begonnen. Diese erlauben es, die technologischen Risiken bei einer Umstellung auf Wasserstoffverbrennung zu reduzieren.



Innovatives Verfahren

Im Forschungsprojekt „H₂-Industrie“ testete die Firma SCHOTT bis Ende Dezember 2022 die Beimischung von Wasserstoff in großtechnischen Schmelzversuchen am Standort Mainz. Die Mainzer Stadtwerke unterstützten das Projekt mit einer mobilen Beimischstation, in der das Erdgas-Wasserstoff-Gemisch erzeugt wird. Schrittweise wurde in der von der Mainzer Netze GmbH konzipierten und betriebenen Anlage der Wasserstoffanteil hochgefahren auf bis zu 35 Volumenprozent. Das Projekt wurde im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert.

Die Umrüstung bereits bestehender Anlagen erscheint nur in begrenztem Umfang zweckmäßig. Der beste Zeitpunkt für einen Systemwechsel ist der Neubau einer Schmelzwanne.

Bei Schmelzwannen, die bereits mit Sonden für eine zusätzliche Nutzung elektrischer Energie durch Boosting ausgestattet sind, kann in der Regel eine Erhöhung des elektrischen Anteils erfolgen. Dieser kann abhängig von den spezifischen Gegebenheiten rund 20 Prozent der Wärmemenge betragen.

³⁷ Biebl et al. (2021), S. 52

03

**PROZESS-
TECHNOLOGIEN
IN DER
PRODUKTION**

3.1 Prozessschritte und Energieeffizienzpotenziale

Die Glasproduktion weist über verschiedene Produktgruppen und Branchensegmente hinweg eine weitgehend vergleichbare Struktur mit gleichen Prozessschritten auf. Unterschiede treten vorrangig bei der Zusammensetzung der Rohstoffe, beim Formgebungsprozess und bei der Glasveredelung auf.

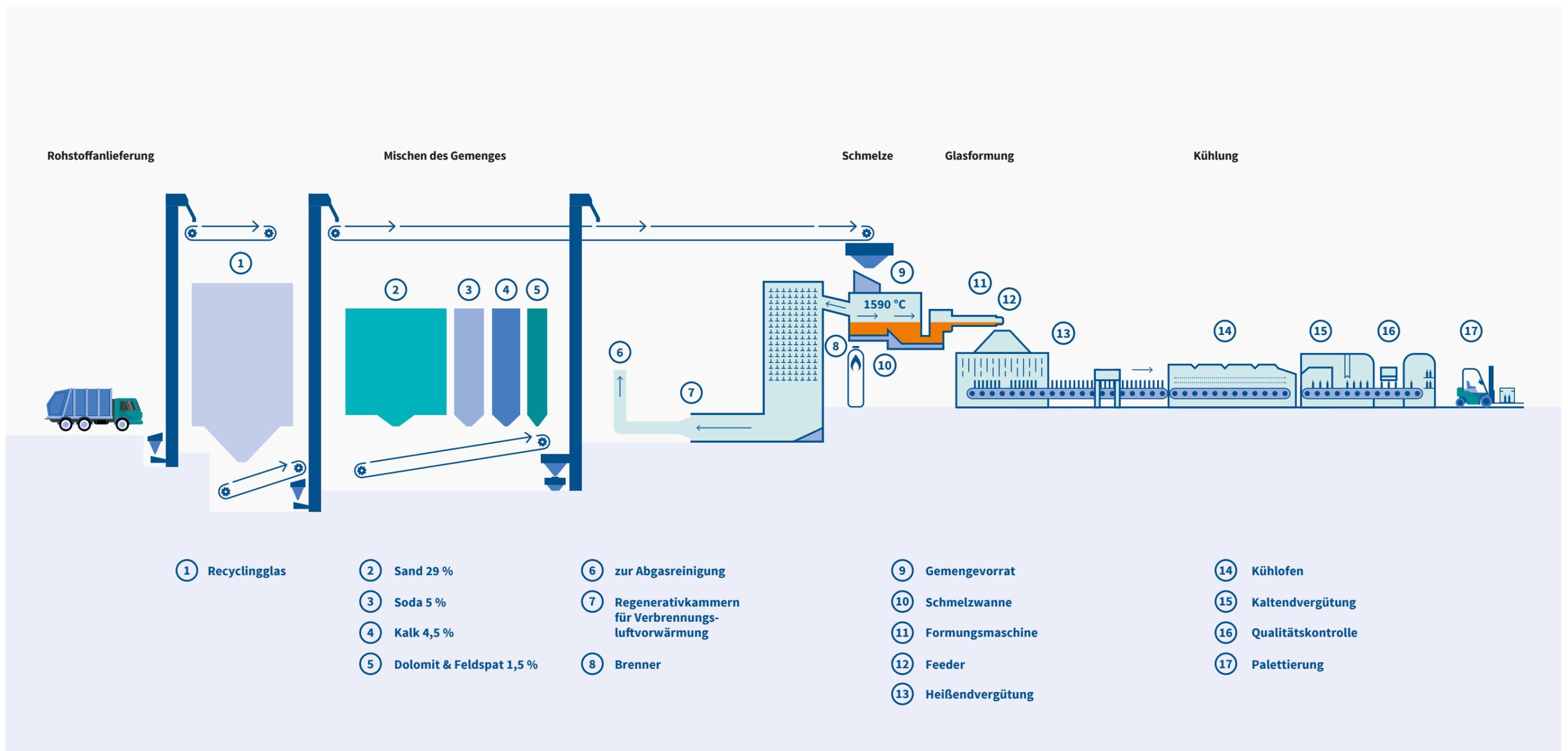
Die der Glasschmelze und Formgebung vor- und nachgeschalteten Prozesse – Rohstoff- und Gemengeaufbereitung, Veredelung, Qualitätssicherung und Verpackung – beruhen in der Regel auf strombasierten Technologien. Generell liegen Effizienzpotenziale dieser Prozesstechnologien im Einsatz energieeffizienter Querschnittstechnologien und werden in [Kapitel 5](#) beleuchtet. Darüber hinaus kann bei der Planung der Rohstoffanlieferung auf kurze Transportwege und CO₂-arme Logistik geachtet werden (Schienenanschluss und Elektromobilität). Der Einsatz von mechanischen Transportbändern ist weniger energieaufwendig als der von Druckluft als zzedium für das Schüttgut. Mittels sequenzieller Mischung des Gemenges kann die erforderliche Schmelzenergie verringert werden.

Der Schmelzprozess ist der energieintensivste Schritt bei der Glasherstellung. Hinsichtlich der angestrebten Energie- und CO₂-Reduktion kommt daher der Schmelzwanne eine zentrale Bedeutung zu. Ein neuer Glasschmelz-Wannenofen wird für eine voraussichtliche Nutzungsdauer von 15 bis 20 Jahren konzipiert. Während dieses Zeitraums sind die Heiztechnologie und damit die CO₂-Emissionen weitgehend festgelegt. Die Energieeffizienzsteigerung der Produktion kann dann nur noch durch Detailoptimierungen und durch Änderungen an der Peripherie erfolgen.

Mit der Neuerrichtung einer Glaswanne wird auch die gesamte Infrastruktur (Energieversorgung, Stofftransport, Abgasführung) auf ein bestimmtes Wannendesign ausgelegt. Auch bei Ersatz einer Schmelzwanne wird diese daher bisher oft fast identisch wiederaufgebaut. Die Umstellung der Glaswannentechnologie auf vollelektrische, hybride oder wasserstoffbeheizte Glasöfen benötigt eine beträchtliche Vorlaufzeit und eine lange Testphase.

Die verschiedenen Schmelzwannen werden hinsichtlich ihrer Energieeffizienzpotenziale in den nachfolgenden Abschnitten 3.2 bis 3.5 gegenübergestellt.





- ① Recyclingglas
- ② Sand 29 %
- ③ Soda 5 %
- ④ Kalk 4,5 %
- ⑤ Dolomit & Feldspat 1,5 %
- ⑥ zur Abgasreinigung
- ⑦ Regenerativkammern für Verbrennungsluftvorwärmung
- ⑧ Brenner
- ⑨ Gemengevorrat
- ⑩ Schmelzwanne
- ⑪ Formungsmaschine
- ⑫ Feeder
- ⑬ Heißendvergütung
- ⑭ Kühlöfen
- ⑮ Kaltendvergütung
- ⑯ Qualitätskontrolle
- ⑰ Palettierung

Abbildung 8: Prozesskette der Behälterglasherstellung mit den Besonderheiten und Aufgaben der verbrennungsbasierten Prozessschritte.
 Quelle: eigene Darstellung nach Biebl et al. (2021)“ statt „Quelle: Biebl et al. (2021)“

Auch in den nachfolgenden Prozessschritten der Produktion sind nennenswerte Energieeffizienzpotenziale verfügbar. An die Glasschmelze schließt sich die Formgebung an, in der Behälterglasherstellung besonders mittels der Fertigungsverfahren Ziehen und Blasen. Hier wird neben mechanischer Energie in der Regel ebenfalls noch Prozesswärme benötigt. Die Herstellung von Flachglas erfolgt im sogenannten Floatglasverfahren.

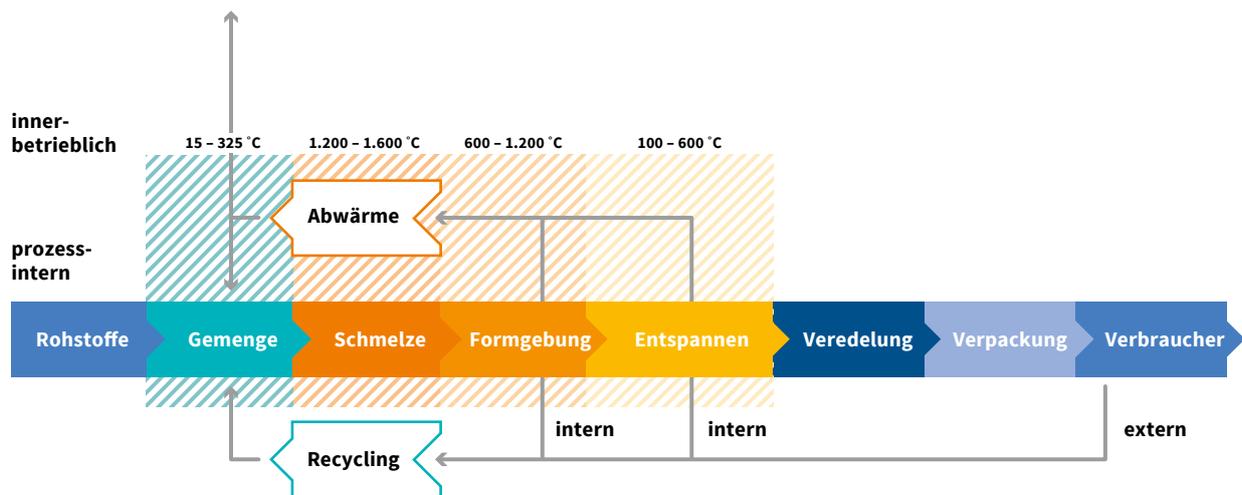


Abbildung 9: Wertschöpfungskette und Temperaturbereiche in der Glasindustrie. Quelle: Leisin (2020, S. 4), für Temperaturbereiche Zierl (2021)

Angeschlossen an die Formgebung folgt eine weitere Temperaturbehandlung in den Kühlöfen bzw. Kühlbahnen. Hier werden bei kontrollierten Temperaturen die durch die Formgebung verursachten Spannungen abgebaut. Während in der Flachglasindustrie Kühlöfen in der Regel elektrisch beheizt werden³⁸, sind die in der Behälterglasproduktion verwendeten Kühlbahnen in der Regel partiell mit Erdgasbrennern beheizt und mit Gebläsen zum Einblasen der Umgebungsluft ausgerüstet. Hier können innovative Kühlelemente für eine Reduktion oder Vermeidung von CO₂-Emissionen sorgen. So sind bereits Kühlkanäle im Einsatz, die mittels Wärmetauscher die Wärme direkt vom Glas abführen. Die Abwärme der Kühlöfen kann dann in anderen Bereichen des Betriebs zum Beispiel für Heizzwecke genutzt werden.

Folgende Ansätze können bei Kühlöfen zur Energieeffizienzsteigerung und CO₂-Minderung genutzt werden:

- Einsatz von elektrisch beheizten Kühlbahnen
- Verbesserte thermische Isolierungen
- Einsatz effizienter Querschnittstechnologien (Motoren, Ventilatoren)
- Bedarfsabhängige Steuerung und Regelung
- Innerbetriebliche Abwärmennutzung

Tipp: Weiterführende Informationen zu bestverfügbaren Technologien und innovativen Verfahren im Bereich der Glas- und Mineralfaserindustrie finden sich in einer Übersicht des [Umweltbundesamts](#).³⁹

³⁸ Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE (2021), S. 24

³⁹ Umweltbundesamt (2013)

3.2 Glasschmelzwannen

Wie bereits ausgeführt, kommt der Glasschmelze als besonders energieintensiver Prozess eine herausragende Bedeutung für den Gesamtenergiebedarf der Glasindustrie zu. Von der in die Schmelzwanne eingebrachten Prozessenergie geht der Großteil der Wärme mit den Abgasen zunächst verloren und kann Großteils über eine Vorwärmung der Verbrennungsluft wiedergewonnen werden. Damit wird der letztendliche Energieverlust der Abgase am Kamin erheblich reduziert. Weitere, diffuse Energieverluste entstehen durch äußere Wandverluste, Abstrahlung, Kühlung und Undichtigkeiten. Schließlich verlässt eingebrachte Prozessenergie auch mit der heißen Glasschmelze den Schmelzofen. Ein Teil davon ist durch die Glasschmelze chemisch gebunden (siehe Abbildung 10).

Bauart, Energieträger, Kapazität, Einsatzstoffe, Alter und Betriebsweise der Schmelzwanne haben einen entscheidenden Einfluss auf die Energieverbräuche und die Treibhausgasemissionen. Der erforderliche Energiebedarf der Glasschmelze ist auch von der Glasart abhängig. Die genauen Werte können abhängig von den Rohmaterialien und der genauen Glaszusammensetzung variieren. Weiter hängt der Energieeinsatz maßgeblich vom genutzten Scherbenanteil ab.

Die genauen Anteile der Wärmebilanz schwanken und müssen anlagenspezifisch mittels Messungen und Berechnungen bestimmt werden. Das Vorliegen einer Wärmebilanz ermöglicht die Bewertung geeigneter Maßnahmen zur Effizienzsteigerung.

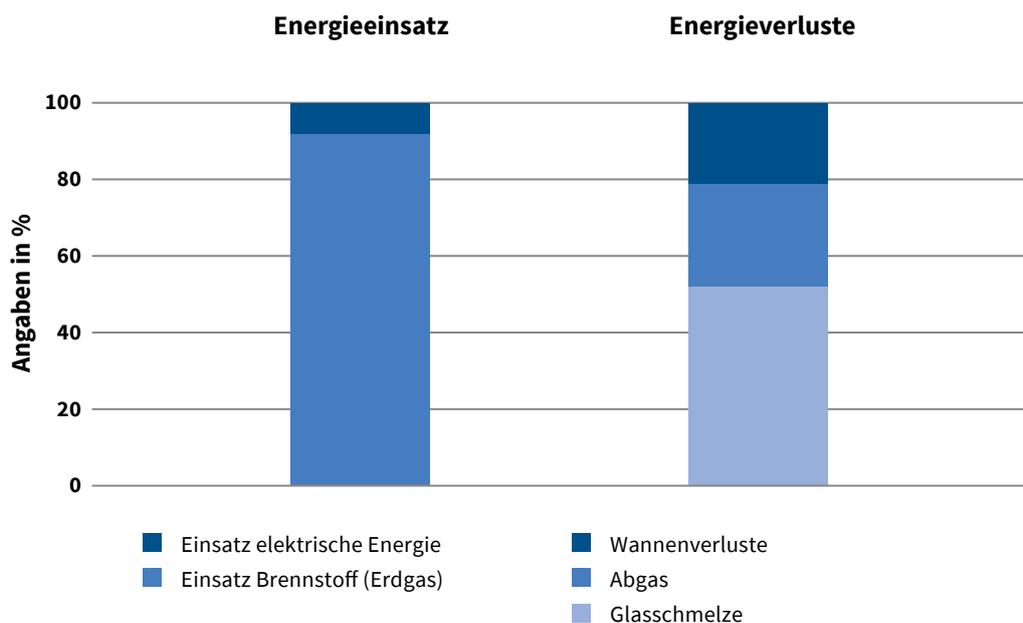


Abbildung 10: Einsatz elektrische Energie einer typischen Glasschmelzwanne. Quelle: eigene Berechnungen

Tipp: Eine detaillierte Analyse und Darstellung der Energieflüsse und Abwärmungspotenziale findet sich in der UBA-Studie [„Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotenziale in der Glas- und Mineralfaserindustrie.“](#)⁴⁰

Referenzformeln für die Glasindustrie ermöglichen eine transparente Darstellung des Energiebedarfs sowie die Identifikation der relevanten Einflussfaktoren auf Energiebedarf und CO₂-Emissionen.⁴¹ Für eine Bewertung der Energieeffizienz einzelner Ofentypen können die theoretischen Prozesswärmebedarfe berechnet und den in der Praxis ermittelten Werten gegenübergestellt werden.



⁴⁰ UBA (2022b)

⁴¹ Paukstat, Anja (2006)

Tipp: Eine Herleitung für den theoretischen Prozesswärmebedarf findet sich in der HVG-Mitteilung Nr. 2037⁴². Die Durchführung eines Energiebenchmarks für Glaswannen kann eine Einschätzung von realistischen Einsparpotenzialen und der Berücksichtigung von Scherbenfraktion, Alter, elektrischer Verstärkung und Ziehrate unterstützen. Eine Anwendung, mit der sich ein Benchmarking online durchführen lässt, findet sich unter <http://benchmarking.celsian.nl>.

Einen großen Einfluss auf den spezifischen Verbrauch hat die Kapazität der Glaswanne. Aus energetischer Sicht ist es effizienter, größere Wannen zu betreiben, sofern diese ausgelastet werden können (siehe Abbildung 11).

Behälterglas ist in der Glasqualität weniger anspruchsvoll als Flachglas, was eine Begrenzung der Läuterzone erlaubt. Endbefeuerte Wannen für Behälterglas erreichen nach Aussage von Herstellern mit ihrer kompakten Bauweise die besten Verbrauchswerte von bis zu 3.800 kJ/kg bei einem Durchsatz von über 300 tpd (tons per day – Tonnen pro Tag). Zu diesen niedrigen Verbräuchen tragen die kompakten Wannengrößen mit einem spezifischen Durchsatz von typischerweise 3 tpd/m² bei.

Querbeheizte Floatglaswannen mit hohen Anforderungen an die Glasqualität benötigen hingegen eine große Zone für die Austreibung von Blasen aus dem fertig geschmolzenen Glas, die sogenannte Glasläuterung. Der spezifische Durchsatz ist daher auf unter 2 tpd/m² begrenzt (unter Ausschluss der Zonen zur Glaskühlung). Daraus ergeben sich höhere Wandverluste des Unter- und Oberofens. Die lang gestreckte Anordnung der lateralen Brenner und Regeneratoren erhöht ebenfalls die Wandverluste. Floatglaswannen weisen zudem er-

Energieverbrauch Schmelzwannen Behälterglas

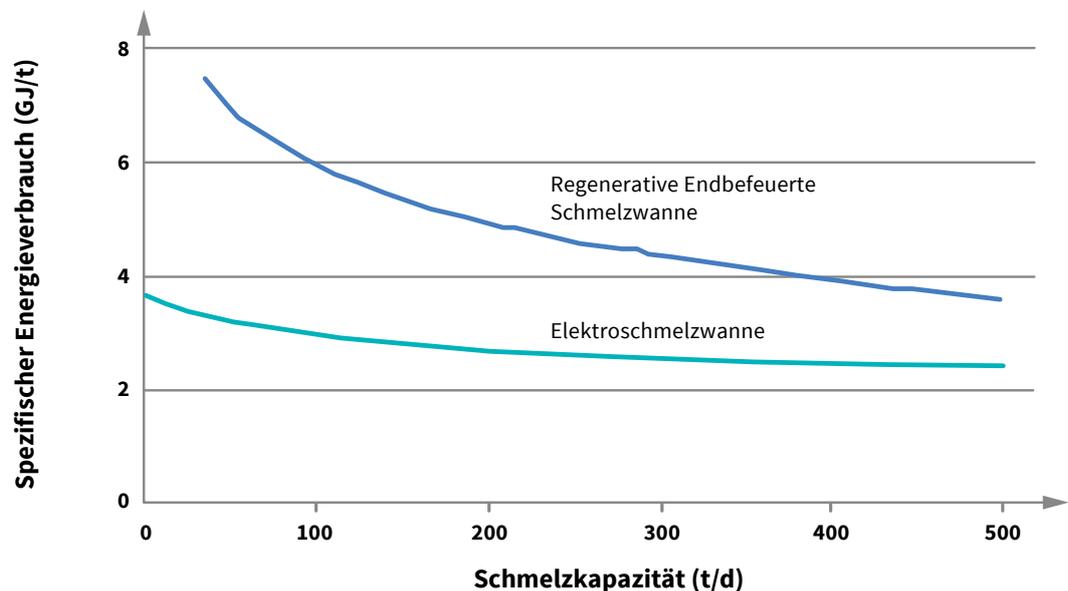


Abbildung 11: Spezifischer Energieverbrauch für endseitig befeuerte Regenerativ- und Vollelektroöfen in der Behälterglasindustrie. Quelle: Zier et al. (2021)

⁴² Conrard, Reinhardt (2003)

höhte Leckraten für Kaltluft auf. Auch erhöht eine Rezirkulation zwischen Schmelztank und Kühlzone den Energieverbrauch. Regenerative Floatglaswannen erreichen daher auch bei großem Durchsatz bestenfalls 5.000 kJ/kg (>900 tpd).

Ein beachtlicher Teil der eingebrachten Prozesswärme entweicht über Wärmeverluste der Schmelzwanne. In der Vergangenheit war die Temperatur, bis zu welcher der Oberofen eingesetzt werden konnte, ein einschränkender Faktor für eine hohe Isolierung. Die erzielten Fortschritte bei Feuerfestmaterialien machen es möglich, dass neue Wannen eine längere Nutzungsdauer (Wannenreisezeit) und eine bessere Isolierung aufweisen. Im Sinne der Energieeffizienz muss die Isolierung sorgfältig nach dem Wannenteil und den Betriebsbedingungen wie Temperatur oder Glasart geplant werden.

Bauarten und Einsatzgebiete von Glasschmelzwannen

Industrielle Glasschmelzöfen werden als kontinuierliche Wannenöfen konzipiert, sodass an einer Seite das Rohstoffgemenge zugeführt und an der anderen Seite das geschmolzene Glas entnommen wird. Die Art und die Auslegung einer Schmelzwanne sind dabei abhängig von der zu produzierenden Glasqualität, -menge und -zusammensetzung. Grundsätzliche Unterschiede bestehen in Bezug auf die Beheizung (direkte Verbrennung, gegebenenfalls als Verbrennung mit reinem Sauerstoff oder elektrisch), die Flammenausrichtung (querbeheizt oder stirnbeheizt) und die Art der Abgaswärmerrückgewinnung.

Der Schmelzprozess wird in die Teilprozesse Rau- und Feinschmelze unterteilt. Bei der Rauschmelze wird das eingeführte Gemenge unter hohen Temperaturen zersetzt, wodurch eine Glasschmelze entsteht. Die entstandene Glasmasse ist sehr inhomogen und mit Gasblasen durchsetzt. Im anschließenden Bereich der Feinschmelze erfolgt eine Läuterung der Glasschmelze, bei der sie homogenisiert und von Gasblasen befreit wird. Je nach geforderter Qualität des zu produzierenden Glases variiert die Verweilzeit des geschmolzenen Glases in der Schmelzwanne. Abschließend gelangt die homogene Glasmasse in einen gesonderten Bereich der Schmelzwanne. Hier kühlt sie ab und nimmt eine für die Formgebung geeignete Viskosität an.⁴³

Seit der Einführung des kontinuierlichen regenerativen Glasschmelzofens im 19. Jahrhundert wurden verschiedene Ofenvarianten mit einer breiten Spanne von täglichen Produktionskapazitäten zwischen 5 und 1.200 tpd entwickelt. Für Kapazitäten von über 500 tpd werden in der Regel querbefeuerte regenerative Öfen eingesetzt. Ein kleinerer Anteil der querbefeuerten Öfen nutzt weniger effiziente Rekuperatoren anstelle von Regeneratoren zur Luftvorheizung. Bei mittleren Kapazitäten zwischen 100 und 500 tpd kommen meist endbefeuerte regenerative Glaswannen zum Einsatz. Bei kleineren Durchsätzen werden teilweise auch vollelektrische Schmelzöfen eingesetzt. Sauerstoffbeheizte Glasöfen mit Ersatz der vorgeheizten Luft durch kryogenen oder VSA-Sauerstoff (Vacuum Swing Adsorption – Druckwechsel-Adsorption) haben nur einen begrenzten Marktanteil erreicht und werden bevorzugt in der Glasfaserherstellung eingesetzt.

Glasschmelzöfen werden heute in der Regel fossil beheizt. In Europa kommt dazu überwiegend Erdgas zum Einsatz, in Asien (insbesondere China) auch Kohle und Petrolkoks. Einige Öfen besitzen eine elektrische Zusatzheizung (EZH, engl. Boosting) mit in die Glasschmelze eingetauchten Elektroden. Vollelektrische Glaswannen kommen heute praktisch ausschließlich bei kleinen Produktionskapazitäten (bis etwa 100 tpd) und bei speziellen Anwendungen zum Einsatz.

Tipp: In Deutschland sind insgesamt 142 Schmelzwannen zur Herstellung von Glasprodukten und Steinwolle in Betrieb. Eine Übersicht über die eingesetzten Schmelzaggregate findet sich in der UBA-Studie [„Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotenziale in der Glas- und Mineralfaserindustrie“](#).⁴⁴

⁴³ Leisin (2020), S. 7

⁴⁴ UBA (2022b)

Schmelzwannen mit regenerativer Wärmerückgewinnung (Regenerativwannen)

Große Schmelzaggregate sind häufig mit Erdgas betriebene, querbeheizte Regenerativwannen, etwa für die Flachglasproduktion (Floatglas). Bei Regeneratoren handelt es sich um Wärmetauscher, die abwechselnd Wärme aufnehmen und diese Wärme wieder an die Verbrennungsluft abgeben. Die Kammern sind im Inneren mit einem Gitterwerk aus Feuerfeststeinen bestückt, die von den heißen Abgasen umströmt und aufgeheizt werden. Die Wärmerückgewinnung durch Regeneratoren, die aus hochgezogenen Kammern zu beiden Seiten der Glasschmelzwanne bestehen, erfolgt diskontinuierlich. Wenn das Gitterwerk eine definierte Temperatur angenommen hat, wird die Befeu-erungsrichtung gewechselt. Die Verbrennungsluft wird durch die Kammer geleitet und heizt sich auf.⁴⁵

Regenerativwannen für die Flachglasproduktion arbeiten mit einer Leistung von bis zu 1.000 tpd. Für die Herstellung von Behälterglas mit einer Tagesproduktion von bis zu 400 tpd werden oft stirnbeheizte Regenerativwannen eingesetzt (siehe nachfolgende Abbildung).⁴⁶

Regenerativwannen sind aufgrund der wirksamen Verbrennungsluftvorheizung relativ energieeffizient. Der maximale theoretische Wirkungsgrad eines Regenerators beträgt rund 77 Prozent, da die Abgasmenge aus der Wanne das Volumen der eintretenden Verbrennungsluft übersteigt und die Wärmekapazität der Abgase das Wärmevermögen der Verbrennungsluft überschreitet. Aus Kostengründen werden in der Praxis Wirkungsgrade von bis zu 70 Prozent erreicht.

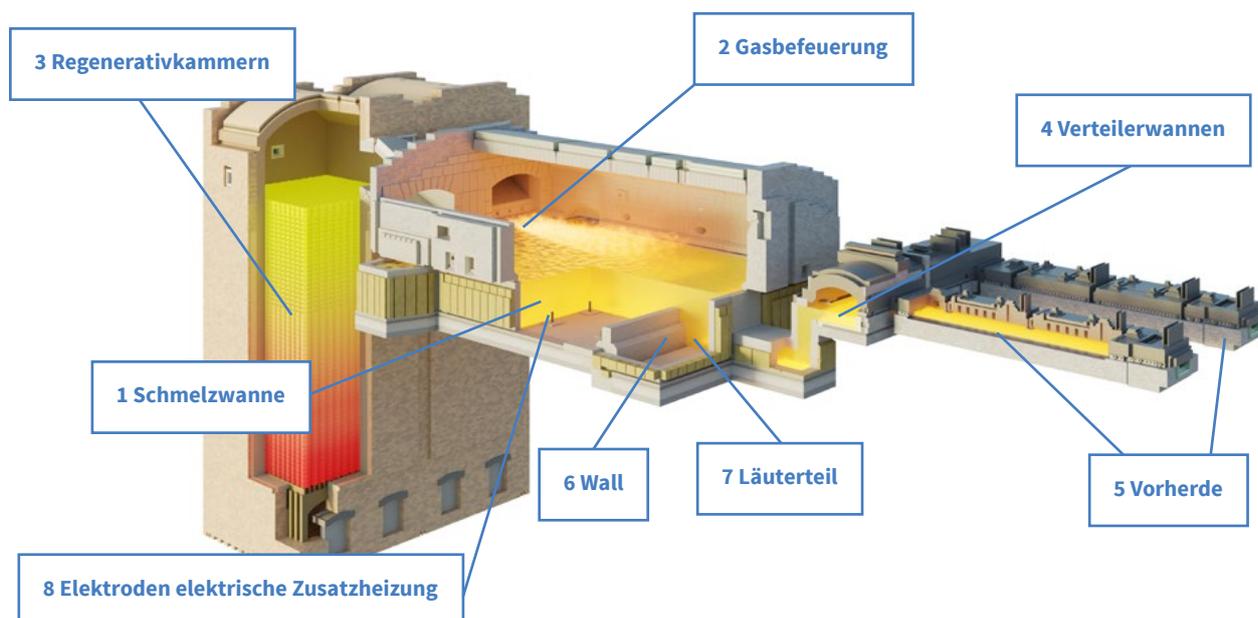


Abbildung 12: Stirnbeheizte regenerative Schmelzwanne mit Kühlsektion. Quelle: Horn Glass Industries AG

⁴⁵ Schaeffer und Langfeld (2014), S. 136

⁴⁶ Schaeffer und Langfeld (2014), S. 137

Der geringe Energieeinsatz pro Tonne geschmolzenes Glas führt zur Verminderung vieler Schadstoffe, die mit der Verbrennung in Verbindung stehen. Allerdings begünstigen die hohen Vorwärmtemperaturen die Bildung höherer NO_x -Werte. Primärmaßnahmen wie optimierte Primärluftmenge und -verteilung sowie Vermischungen der Abgasströme können hier zu einer wirkungsvollen Emissionsminderung führen. Die maximalen Vorwärmtemperaturen der Luft liegen für marktgängige Regenerativwannen in der Flach- und Hohlglasproduktion bei 1.300 °C.⁴⁷

Bei Regenerativwannen tendieren stirnbeheizte U-Flammenwannen zu einer höheren Energieeffizienz und geringeren Emissionen. Bei U-Flammenwannen liegen sowohl die Brenner als auch die Abgaskanäle an der Stirnseite, wobei sich eine U-Form der Flammen ausbildet. Bei Querbrennerwannen sind die Brenner und Abgaskanäle gegenüberliegend an den Seiten der Wanne angeordnet. Mit einer regenerativen Luftvorwärmung ist es möglich, die Hitzeschwerpunkte möglichst effektiv zu regulieren, indem periodisch die Brennerseiten gewechselt werden. Durch die bessere Kontrolle über den Massenstrom der Glasschmelze kann die Fertigung von Qualitätsglas auch in größeren Wannen gewährleistet werden.

Die hohen Investitionskosten für Regenerativwannen sind üblicherweise nur für die großtechnische Herstellung von Glasprodukten mit mehr als 100 tpd wirtschaftlich tragbar. Für Produktionsraten von mehr als 500 tpd werden in der Regel regenerative Querbrennerwannen eingesetzt, um eine gute Temperaturverteilung über die gesamte Länge der Wanne zu erzielen.⁴⁸

Genauere Messungen der Temperaturen im Regenerator tragen zu einer hohen Effizienz des Schmelzvorgangs bei. Ebenso bieten sie eine frühzeitige Warnung vor einer falschen oder unsymmetrischen Befuerung, die sich negativ auf die Produktqualität und den Energieverbrauch auswirken kann.

In bestimmten Bereichen der Wanne kann eine zusätzliche Isolierung ohne großes Schadensrisiko erfolgen. Eine Isolierung durch aufgespritzte Fasern trägt wesentlich zur Minderung von Wärmeverlusten bei, wenn sie auf die Struktur des Regenerators aufgetragen wird. Diese einfache, kostengünstige Methode kann die Wärmeverluste des Regenerators um bis zu 50 Prozent reduzieren und Energieeinsparungen im Bereich von 5 Prozent ermöglichen. Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass dieses Material sämtliche Risse an der Struktur des Regenerators abdichtet und somit das Eintreten von Kaltluft und das Austreten von Heißluft reduziert.⁴⁹

⁴⁷ UBA (2022b), S. 49, S. 56

⁴⁸ Leuthold (2013), S. 170

⁴⁹ Leuthold (2013), S. 322

Schmelzwannen mit rekuperativer Wärmerückgewinnung (Rekuperativwannen)

Rekuperativwannen ermöglichen zwar die Rückgewinnung der Wärme über ein Wärmetauschersystem, sie sind aber weniger energieeffizient als Regenerativwannen. Für die rekuperative Wärmerückgewinnung ist ein kontinuierlich arbeitender

Wärmeaustauscher, der Rekuperator, erforderlich. Dabei werden die heißen Abgase durch Rohre aus einem gut wärmeleitenden Material geführt, während die Verbrennungsluft diese Rohre umströmt und somit vorgewärmt wird. Die maximalen Vorwärmtemperaturen der Luft liegen für marktgängige Stahlrekuperatoren bei 700 °C.⁵⁰

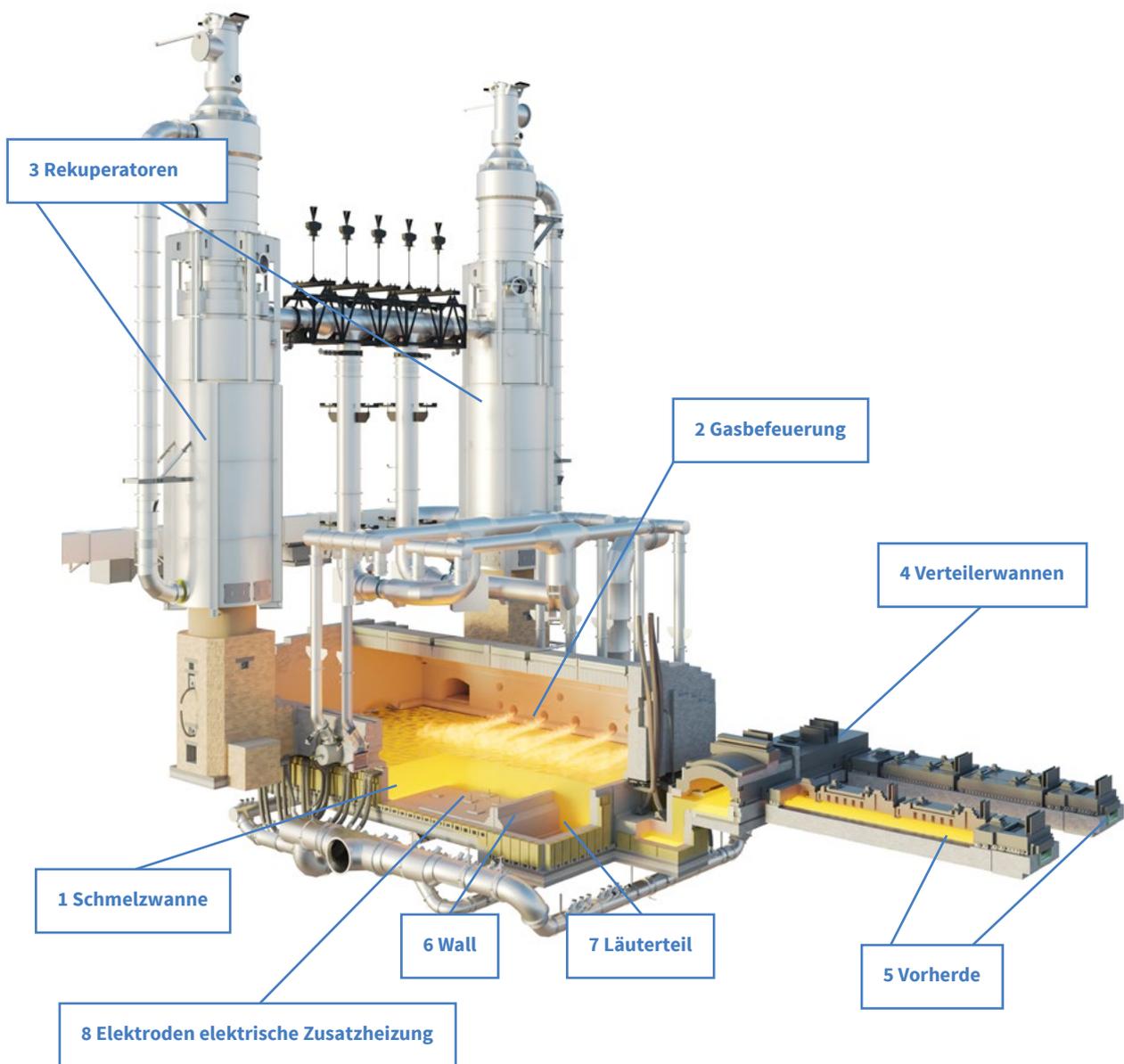


Abbildung 13: Seitenbeheizte rekuperative Schmelzwanne mit Kühlsektion. Quelle: Horn Glass Industries AG

⁵⁰ Schaeffer und Langfeld (2014), S. 136

Energieeffiziente Brennertechnik

Brenner sind ein wesentlicher Bestandteil der gasbefeuerten Schmelzwannen. Aber auch in den nachfolgenden Prozessschritten wie in den Kühlöfen werden oft ebenfalls kleinere gasbefeuerte Brenner eingesetzt. Durch die Brenner erfolgt die Umwandlung von chemischer in thermische Energie. Dabei kann zwischen verschiedenen Brennstoffen, Flammtypen und Arten der Regelung unterschieden werden. So gibt es Einstufenbrenner (Ein-/Aus-Regelung), Zwei- oder Mehrstufenbrenner sowie regelbare, sogenannte modulierende Brenner. Ansätze für Effizienzpotenziale bestehen in einer optimierten und somit gleichmäßigen Wärmeverteilung, einem bedarfsgerechten Wärmeangebot (Brennzone) sowie einer effizienten Wärmeübertragung.

Während der Verbrennung mit Luftsauerstoff entstehen bei Verbrennungstemperaturen ab

etwa 1.300 °C auch Stickoxide (NO_x).⁵¹ Mit höheren Temperaturen nimmt die Bildungsrate von NO_x exponentiell zu. Um die Umweltbelastung zu verringern, müssen diese mittels Rauchgasreinigung reduziert werden.

Energieeffizienzpotenziale bestehen durch den Einsatz und die Optimierung von Low- NO_x -Brennern, durch innovative Heiztechniken wie die Glas-FLOX-Hochtemperatur-Verbrennungstechnologie und durch eine verbesserte Abwärmenutzung. Wurde bislang nur wenig oder gar nicht in diese Techniken investiert, können durch ihren Einsatz NO_x -Emissionsminderungen von 40 bis 60 Prozent erzielt werden.⁵² Neben den Brennersystemen zur Minderung der NO_x -Bildung steht als Brennertechnik auch eine flammenlose Verbrennung zur Verfügung.⁵³ Eine detaillierte Übersicht zu NO_x -Technologien findet sich in einem entsprechenden Merkblatt der Europäischen Kommission.⁵⁴

3.3 Sauerstoffverbrennung (Oxy-Fuel-Schmelze)

Eine Weiterentwicklung der Verbrennungstechnik stellt die Sauerstoffverbrennung oder Oxy-Fuel-Schmelze dar. Hierbei wird durch die Verbrennung von reinem Sauerstoff das Aufheizen von Verbrennungsluft auf Flammentemperatur vermieden,

die zu rund 80 Prozent aus Stickstoff besteht. Daher kommt die Oxy-Fuel-Technologie mit deutlich niedrigeren Brenngas-Volumenströmen aus und die Bildung von Stickoxiden wird stark reduziert.

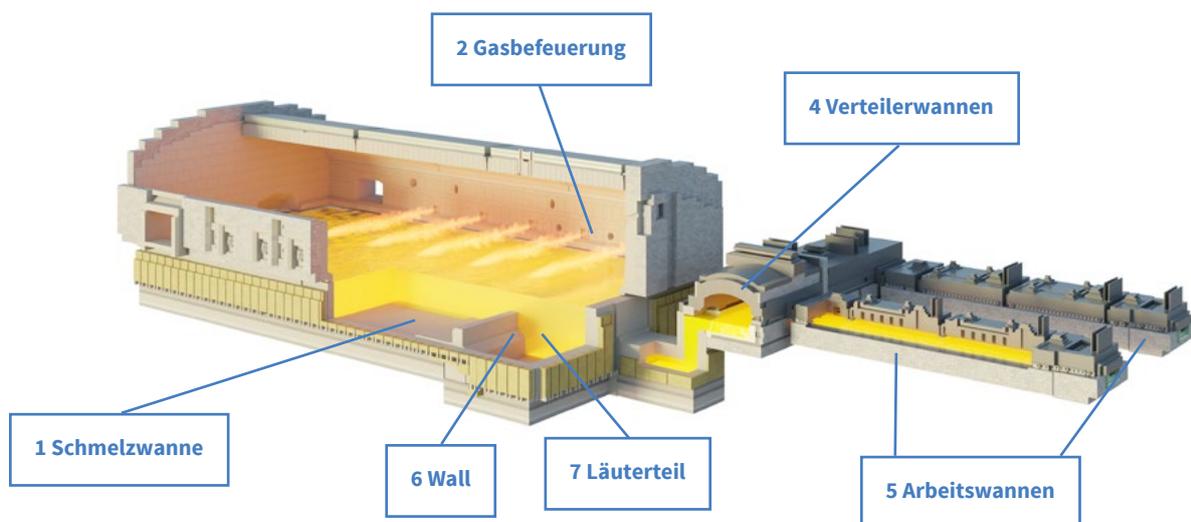


Abbildung 14: Oxy-Fuel-Schmelzwanne. Quelle: Horn Glass Industries AG

⁵¹ Leuthold (2013), S. 216

⁵² Leuthold (2013), S. 219

⁵³ Leuthold (2013), S. 218

⁵⁴ European Commission (2013)

Energiekosten Sauerstoffverbrennung

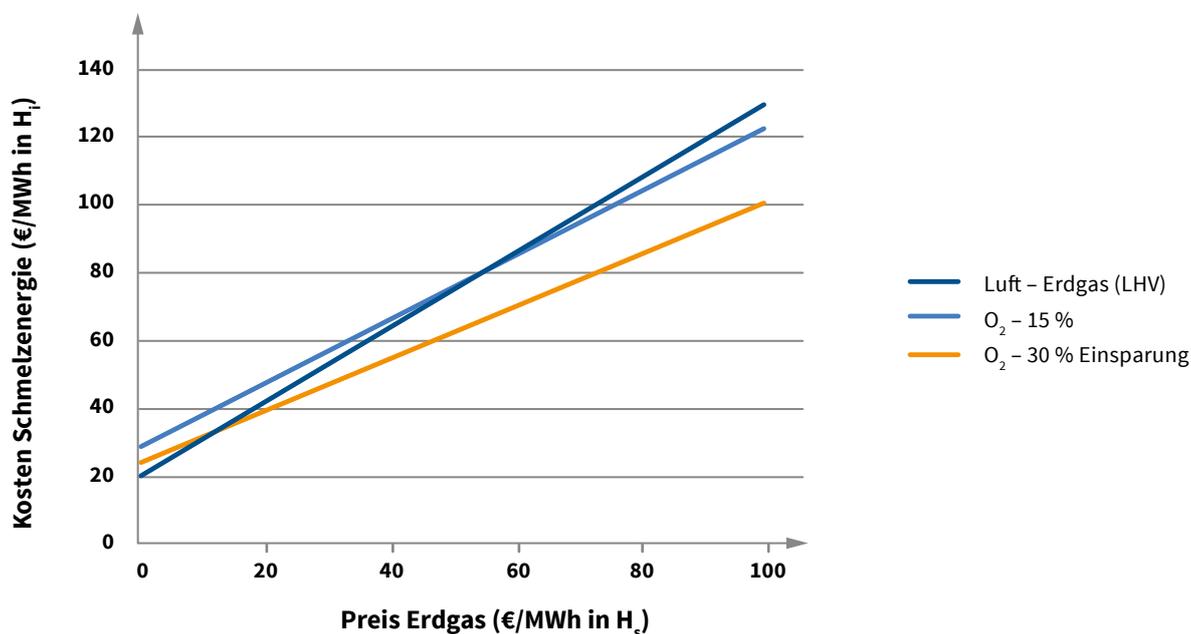


Abbildung 15: Energiekosten der Sauerstoffverbrennung im Vergleich zu einer Luftverbrennung. Quelle: dena

Da die Sauerstoff-Erdgas-Flamme eine höhere Flammentemperatur erzielt, bietet diese Art der Befuerung Vorteile bei Spezialglasschmelzen sowie bei Endlosglasfasern, die höhere Schmelztemperaturen erfordern. Die Technik wird aktuell bei rund 10 Prozent der Schmelzwannen eingesetzt und ist demnach gut etabliert.⁵⁵

Mit der Oxy-Fuel-Technik lassen sich gegenüber konventionellen Schmelzwannen Brennstoffeinsparungen von rund 15 Prozent erzielen. Allerdings ist hier der zusätzliche Energiebedarf für die Sauerstoffherzeugung hinzuzurechnen. In die Kostenrechnung der Sauerstoffverbrennung fließt zusätzlich zum Erdgaspreis auch der Preis für Sauerstoff ein. Dieser kann geliefert oder vor Ort aus Eigenproduktion hergestellt werden. Letzteres ist gerade in größeren Anlagen wirtschaftlich vorteilhafter. Aufgrund der stromintensiven Produktion, zum Beispiel durch Rektifikation oder das Linde-Verfahren, sind die Kosten der Sauerstoffherzeugung stark vom Strompreis abhängig.

Im Allgemeinen haben Oxy-Fuel-Öfen mehrere seitliche Brenner und eine einzige Abgasauslassöffnung. Damit basieren sie auf der gleichen Grundkonstruktion wie Standard-Schmelzöfen. Jedoch

verwenden Öfen, die für die Sauerstoffverbrennung ausgelegt sind, in der Regel keine Wärmerückgewinnungssysteme, um die Sauerstoffzufuhr vorzuwärmen. Durch den Wegfall der Regeneratoren oder Rekuperatoren führt der Einsatz von Oxy-Fuel zu verringerten Investitionskosten.⁵⁶

Bei einer Verbrennung mit Erdgas-Sauerstoff-Vorwärmung wird zusätzlich die Abwärme aus dem Schmelzprozess nutzbar. So kann nach Herstellerangaben die Energie aus dem Abgasstrom über Wärmetauscher zur Vorwärmung des Sauerstoffs auf 550 °C und des Erdgases auf 450 °C genutzt werden. Das erhöht den Wirkungsgrad der Oxy-Fuel-Verbrennung erheblich und ermöglicht eine zusätzliche Senkung des Energieverbrauchs um rund 10 Prozent gegenüber einer konventionellen Brennstoff-Sauerstoff-Verbrennung.

Die Wirtschaftlichkeit der Sauerstoffverbrennung ist neben der Energieeffizienzsteigerung abhängig vom Verhältnis der Strom-, Erdgas- und CO₂-Kosten. Zusätzliche positive Effekte entstehen durch eine einfachere Stickoxidreinigung und eine vermiedene Regeneratorwartung. Bei hohen Gaspreisen (über 60 €/MWh) kann eine Kostendeckung erreicht werden. Durch ergänzende Techniken

⁵⁵ Leuthold (2013), S. 238

⁵⁶ Leuthold (2013), S. 237

zur Verbrauchsminderung wie die Scherben- und Gemengevorheizung kann eine Erdgasverbrauchsverringerung von bis zu 30 Prozent erzielt und die Wirtschaftlichkeit bereits ab einem Erdgaspreis von 25 €/MWh erreicht werden.

Zusätzlich zum Erdgaspreis verschiebt auch ein steigender CO₂-Preis die Balance zugunsten der Sauerstoffverbrennung. Bei einem CO₂-Preis von 100 €/t CO₂ ergeben sich Zusatzkosten einer Gasfeuerung in Höhe von 20 €/MWh. Unter dieser Bedingung wird eine (konventionelle) Sauerstoffverbrennung bei Gaspreisen von 50 €/MWh wirtschaftlich. Abbildung 15 zeigt die Schmelzenergiekosten in Abhängigkeit von den Erdgaspreisen (Sauerstoffpreis von 0,07 €/Nm³, CO₂-Preis von 100 €/t).

Tipp: Ein Beispiel für tatsächliche und geschätzte Kosten einer Oxy-Fuel-Schmelze bei der Behälterglas- und Spezialglasherstellung findet sich im BVT-Merkblatt.⁵⁷

Die Umstellung auf Sauerstoffverbrennung erfordert wegen der verringerten Abgasmenge und des Wegfalls der vorgeheizten Luft in der Regel einen Wannenumbau. Eine Anpassung der Ofenkonzeption in Richtung Sauerstoffverbrennung nach modernen Designkriterien erlaubt den Bau langlebiger Sauerstoffwannen mit hoher Glasqualität bei gleichzeitig niedrigen Energieverbräuchen. Als wirtschaftlich sinnvoll erweist sich dies in der Regel bei einem Neubau⁵⁸, wobei querbeheizte Wannen aufgrund ihrer höheren Länge im Verhältnis zur Breite leichter umzurüsten sind und sich eine Überprüfung daher lohnt.

3.4 Hybride Schmelzwannen (Boosting)

Viele der erdgasbefeuerten Schmelzwannen, insbesondere in der Behälterglasindustrie, sind bereits heute mit einer elektrischen Zusatzheizung (EZH) ausgerüstet. Die Kapazität beträgt in der Regel 10 bis 15 Prozent des Energiebedarfs. Bei einzelnen Spezialglasproduktionen mit Verdampfungs- und Schaum-Problemen werden sogar bis zu 40 bis 50 Prozent elektrische Energie eingesetzt.

Neben der Steigerung der Energieeffizienz und der Verringerung der Abgasverluste dient die elektrische Zusatzheizung der Optimierung des Prozesses, da die Energiezufuhr von der Unterseite der Wanne eine gleichmäßige Temperaturverteilung in der Schmelze begünstigt und die energiebrauchende Verweildauer im Ofen reduziert.

Hybride Schmelzwannen, die einen hohen Anteil an elektrischem Heizen und damit eine Verringerung der Brennheizung erlauben, bieten eine Alternative zu vollelektrischen Wannen. Sie erhalten eine gute Flexibilität bei Durchsatz, Scherbenanteil und Glastönung. Das hybride Prinzip lässt sich sowohl auf Behälterglas mit Bodendurchlass als auch

auf Flachglaswannen mit großen Läuterzonen und Auslass mit Einschnürung anwenden.

Hybride Wannen unterscheiden sich von anderen Konzepten der Elektrifizierung. Beispielsweise hat der Einsatz von „Superboosting“ hauptsächlich eine Erhöhung der Produktionskapazität bei unveränderter Wannengröße zum Ziel. Der Energieeintrag durch Verbrennung wird dabei kaum verringert. Hybride Wannen hingegen zielen auf eine drastische Reduzierung der Verbrennung ab. Dies hat Folgen für die Temperaturen des Oberofens. Hier müssen das Design des Oberofens und die Auslegung des Verbrennungssystems angepasst werden.

In einem modernen Hybriddesign können durch eine gezielte Optimierung die verbleibenden Rauch- und Gemengegase auf etwa 400 °C abgekühlt werden.⁵⁹ Dies ermöglicht noch eine effiziente Abgasreinigung (NO_x, Staub) sowie die Vermeidung des Säuretaupunkts. Die niedrigen Rauchgastemperaturen machen eine Rückgewinnung der Wärmeenergie durch Regeneratoren oder Rekuperatoren unnötig, was die Gesamtkonzeption vereinfacht.

⁵⁷ Leuthold (2013), S. 293

⁵⁸ Leuthold (2013), S. 237

⁵⁹ Kuhn, GPC (2019)

Die spezifischen Energieverbräuche derartiger Wannen sind sehr niedrig und vergleichbar mit vollelektrischen Wannen (Abbildung 16). Mit zunehmendem Anteil elektrischer Energie können die spezifischen Energieverbräuche signifikant gesenkt werden. Berechnungen zeigen eine Verringerung⁶⁰ der spezifischen Verbrauchswerte einer effizienten U-Flammenwanne für weißes Behälterglas (Kapazität von >300 tpd) von 3.800 kJ/kg bis zu einer vollelektrischen Wanne gleicher Kapazität mit 2.600 kJ/kg.

Numerische Simulationen der Schmelzwannenhersteller zeigen eine Machbarkeit hybrider Wannen mit 80 Prozent elektrischer Leistung und Produktionsraten von 500 tpd für Behälterglas. Designstudien und numerische Simulationen zeigen die Machbarkeit großer Floatglaswannen mit 70 Prozent elektrischer Leistung.⁶¹ Die verbrennungsbedingten Emissionen können bei 80 Prozent elektrischer Heizung auf etwa 30 kg CO₂/t Glasschmelze reduziert werden. Durch den niedrigen Brennstoffverbrauch wird auch eine Umstellung auf Wasserstoff- oder Biogasverbrennung realistischer.

Neuere Glasschmelzwannen erlauben bereits Anteile der elektrischen Zusatzheizung (EZH) von bis 25 Prozent. Speziell optimierte Hybridwannen

ermöglichen sogar eine Erhöhung der elektrischen Energieanteile auf bis zu 50 Prozent. Sogenannte Superhybridwannen gehen darüber sogar noch hinaus. Nach Aussagen von Herstellern befinden sich bereits mehrere mittelgroße hybride Wannen bereits in Planung.



Innovatives Verfahren

Das Unternehmen Ardagh Glass errichtet aktuell in Kooperation mit 20 Behälterglasherstellern aus ganz Europa die weltweit größte Hybrid-Oxy-Fuel-Schmelzwanne in Obernkirchen in Niedersachsen. Das Werk stellt Glasbehälter für Lebensmittel her. Das Produktionsvolumen liegt bei etwa 1,1 Millionen Behältern am Tag. 80 Prozent des derzeit eingesetzten Erdgases für den Schmelzprozess sollen durch erneuerbare Energien ersetzt, der Kohlendioxid-Ausstoß der Glashütte soll um bis zu 50 Prozent reduziert werden. Mit der Technologie können die Hersteller zudem große Mengen an Recycling-Glas einsetzen. Das Demonstrationsprojekt soll erste Ergebnisse im Jahr 2023 liefern.

Energieverbräuche elektrischer Schmelzwannen

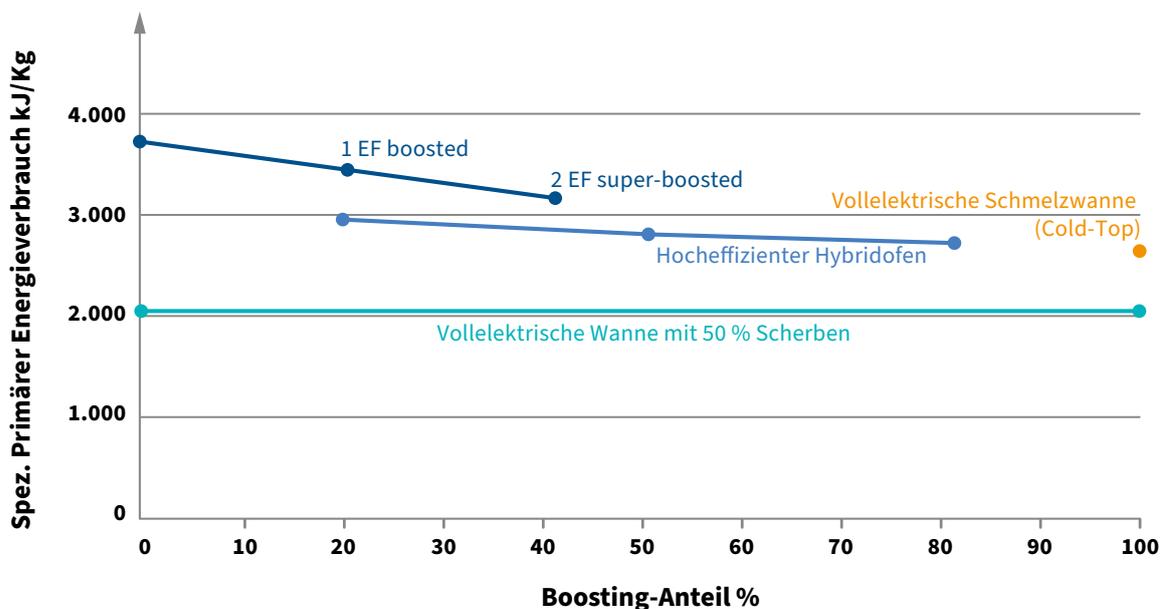


Abbildung 16: Spezifische Energieverbräuche von regenerativen, hybriden und vollelektrischen Wannen verglichen mit der theoretischen Schmelzenergie
Quelle: dena

⁶⁰ Berechnungen Dr. Kuhn, Wärmebilanzen Hersteller Fives, Simulation mit Celsius

⁶¹ Kuhn (2022)

3.5 Vollelektrische Glasschmelzwannen

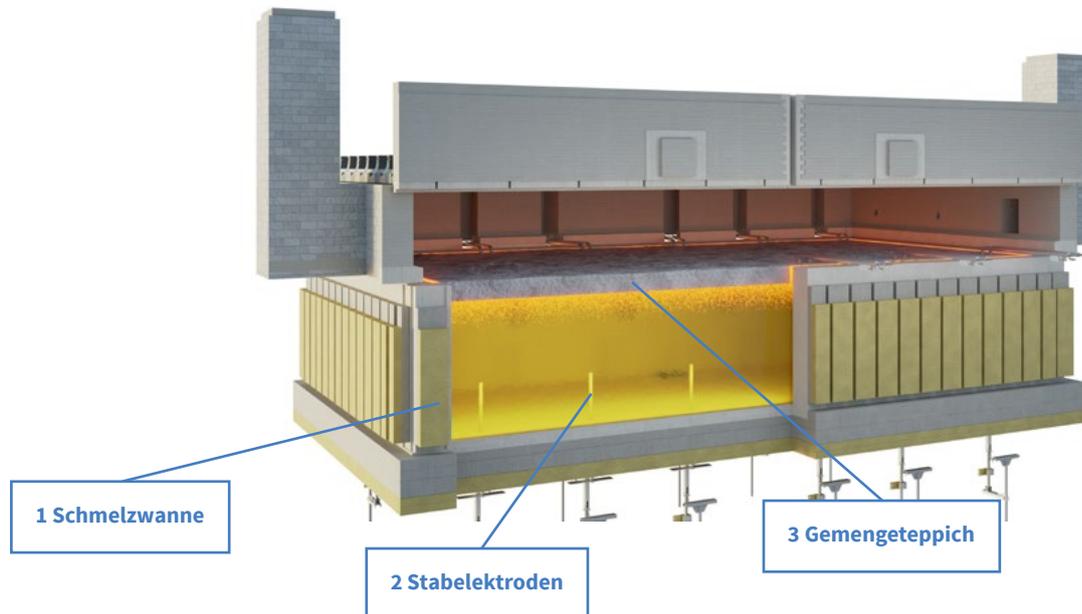


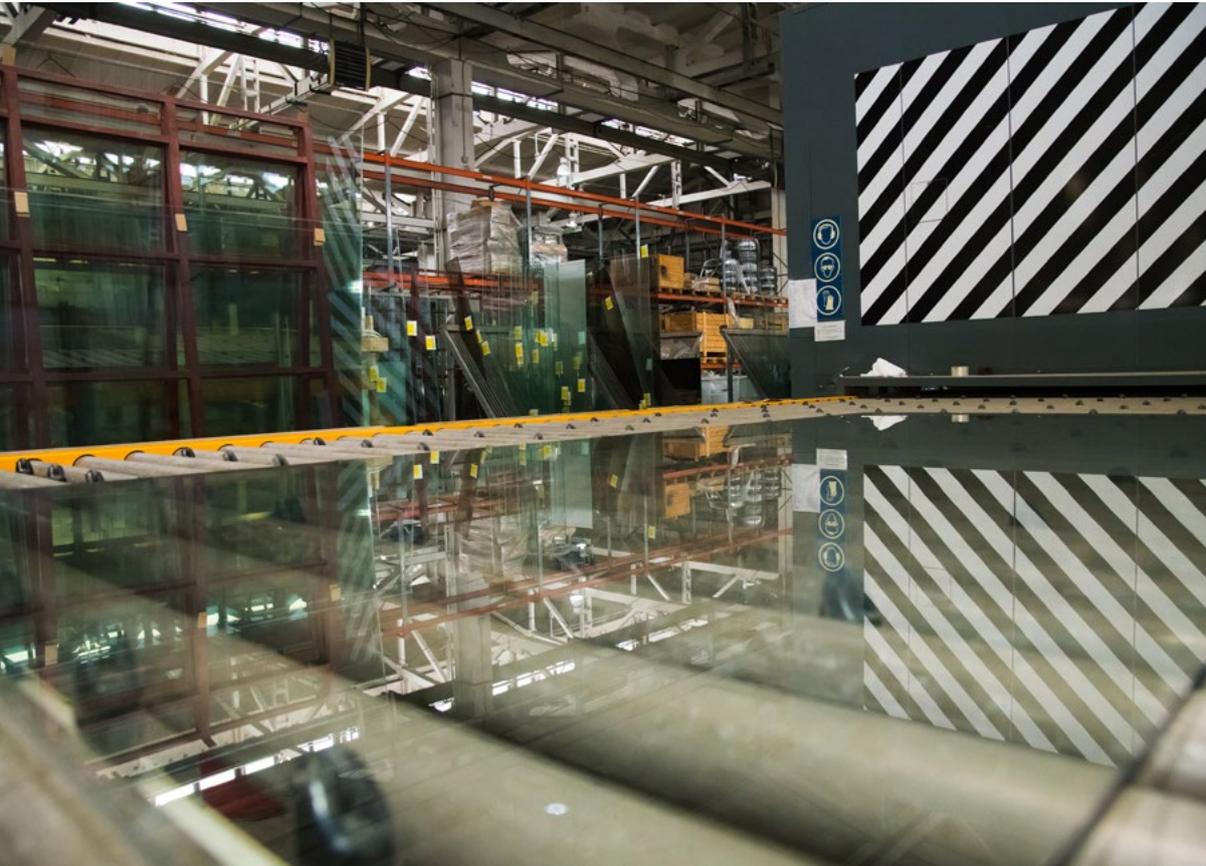
Abbildung 17: Vollelektrische Schmelzwanne. Quelle: Horn Glass Industries AG

In vielen der 160 europäischen Glashütten arbeitet die Branche bereits mit Elektro-Schmelzwannen. Hierbei handelt es sich um kleinere Glashütten, die in der Regel für das Herstellen von Weißglas genutzt werden und die kaum oder gar nicht recyceltes Glas einsetzen. Vollelektrische Wannen sind heute auch aufgrund anlagentechnischer Limitierungen auf maximal 200 tpd (in Ausnahmen 300 tpd) beschränkt.

Elektrowannen erreichen eine besonders hohe Energieeffizienz. Die Bestwerte liegen für einen Durchsatz über 100 tpd bei einem Scherbeneneinsatz 50 Prozent bei einem Endenergiebedarf von etwa 2.700 kJ/kg.⁶²

Die thermischen Verluste vollelektrischer Schmelzwannen konzentrieren sich auf die Wände des Unterofens und der Wanne sowie auf die Kühlverluste der Elektroden. Verluste durch die Rohstoffgase hängen vom Scherbenanteil ab und bleiben relativ beschränkt. Weitere Verluste sind abhängig von der Effizienz der Stromversorgung und der Steuerung. Die Transformatoren oder Thyristorsteuerungen mit Anschlussleitungen erreichen heute Verluste unter 10 Prozent. Letztlich hängt der Energiebedarf einer Elektrowanne von der Auslasstemperatur des Glases ab, die wegen des Läuterprozesses nicht wesentlich unter 1.400 °C gesenkt werden kann.

⁶² Kuhn, Reynolds (2017)



Bei Elektrowannen erzeugt der Gemegeteppich in der Glaswanne eine relativ gute Isolierung, welche die Temperatur des Oberofens auf typische 300 °C beschränkt. Die durch chemische Reaktion emittierten Gase diffundieren durch den geschlossenen Gemegeteppich und kühlen sich dabei ab. Zum Vergleich: Bei Glasöfen mit Verbrennungstechnik entstehen durch eine Temperatur des Oberofens von ca. 1.500 °C zusätzliche Energieverluste durch die Außenwände.

Aufgrund der bisher günstigen Erdgaspreise, aber auch wegen anlagentechnischer Limitierungen wurden bis heute keine sehr großen vollelektrischen Wannen für Behälter- oder Flachglas entwickelt. Die Situation ändert sich bei höheren Kosten für Erdgas und CO₂-Emissionen. Unter Berücksichtigung der höheren Energieeffizienz der elektrischen Heizung wird das elektrische Glasschmelzen zunehmend wirtschaftlich. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund gestiegener Gaspreise und bei Einberechnung der Kosten für die Rauchgasbehandlung fossiler Feuerungen.

Die thermischen Verluste vollelektrischer Schmelzwannen konzentrieren sich auf die Wände des Unterofens und der Wanne sowie auf die Kühlverluste der Elektroden. Verluste durch die Rohstoffgase hängen vom Scherbenanteil ab und bleiben relativ beschränkt. Weitere Verluste sind abhängig von der Effizienz der Stromversorgung und der Steuerung. Die Transformatoren oder Thyristorsteuerungen mit Anschlussleitungen erreichen heute Verluste unter 10 Prozent.⁶³ Letztlich hängt der Energiebedarf einer Elektrowanne von der Auslasstemperatur des Glases ab, die wegen des Läuterprozesses nicht wesentlich unter 1.400 °C gesenkt werden kann.

Bei Elektrowannen erzeugt der Gemengeteppich in der Glaswanne eine relativ gute Isolierung, welche die Temperatur des Oberofens auf typische 300 °C beschränkt. Die durch chemische Reaktion emittierten Gase diffundieren durch den geschlossenen Gemengeteppich und kühlen sich dabei ab. Zum Vergleich: Bei Glasöfen mit Verbrennungstechnik entstehen durch eine Temperatur des Oberofens von ca. 1.500 °C zusätzliche Energieverluste durch die Außenwände.

Aufgrund der bisher günstigen Erdgaspreise, aber auch wegen anlagentechnischer Limitierungen wurden bis heute keine sehr großen vollelektrischen Wannen für Behälter- oder Flachglas entwickelt. Die Situation ändert sich bei höheren Kosten für Erdgas und CO₂-Emissionen. Unter Berücksichtigung der höheren Energieeffizienz der elektrischen Heizung wird das elektrische Glasschmelzen zunehmend wirtschaftlich. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund gestiegener Gaspreise und bei Einberechnung der Kosten für die Rauchgasbehandlung fossiler Feuerungen.

Für die Umstellung der Glasschmelze von fossiler Beheizung auf direkte elektrische Widerstandsbeheizung besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Zu den wesentlichen technischen Herausforderungen zählen:

- Beherrschung der Schmelzkonvektion beim Läuterprozess unter dem „kalten“ Gemengeteppich
- Dimension des Wannenauslasses besonders für hohen Durchsatz
- Oberofenkonstruktion und Gemengebeschickung bei sehr großen Dimensionen
- Gefahr von Kurzschlussströmungen und lokalen Überhitzungen durch hohe lokale Energiefreisetzungen
- Gefahr von Elektrodenkorrosion durch hohe elektrische Stromdichten und technische Grenzen für die notwendige elektrische Spannung
- Strahlungstechnische Abschirmung der heißen Glasschmelze vom kalten Oberofen in Verbindung mit hohen Scherbeneinsätzen
- Erhöhung der Nutzungsdauer der Glaswannen

Auch unter den heute noch gegebenen technischen Restriktionen kann eine vollelektrische Schmelze insbesondere bei der Herstellung von qualitativ weniger anspruchsvollen Gläsern wie in der Behälterglasindustrie verstärkt zum Einsatz kommen. Voraussetzung dafür ist neben konkurrenzfähigen Strompreisen für Großverbraucher die Verfügbarkeit von entsprechend hohen elektrischen Anschlussleistungen am Standort.

⁶³ Hierbei sind Verluste bei Stromerzeugung und -transport noch nicht einbezogen.

04

ABWÄRME

4.1 Abwärmennutzung Überblick

Rund 80 Prozent des Energiebedarfs in der Glasindustrie werden für die Prozesswärmeerzeugung eingesetzt (siehe auch Kapitel 1). Eine Vermeidung und Nutzung von Abwärme sind daher in der energieintensiven Glasherstellung sowohl für die Energieeffizienz als auch für die Reduzierung der CO₂-Emissionen von zentraler Bedeutung. In den Unternehmen kommen dabei traditionell verschiedene Möglichkeiten zur Vermeidung bzw. Nutzung von Abwärme zum Einsatz.

Trotz der Energieeffizienzsteigerungen in der Vergangenheit entstehen in der Glasproduktion immer noch große Mengen ungenutzter Abwärme, die mit dem Abgas oder über Rückkühlanlagen an die Umgebung abgegeben werden. Unter Berücksichtigung der technisch heute verfügbaren Möglichkeiten stehen in der Hohlglasindustrie noch 4,3 PJ/a, in der Flachglasindustrie 2,7 PJ/a und in der Spezialglasindustrie 1 PJ/a für Abwärmennutzungssysteme zur Verfügung.⁶⁴ Potenzialreiche Abwärmequellen sind Rauchgase, Kühlwasser und Abluft. Daneben bestehen abhängig von der Produktion auch dezentrale Abwärmequellen in der Kälterzeugung, der Druckluftherzeugung oder am Kühllofen.

Tipp: Eine umfassende Analyse der Abwärmepotenziale in der Glasindustrie ist in der UBA-Studie „[Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotenziale in der Glas- und Mineralflaserindustrie](#)“ veröffentlicht.⁶⁵

Zur Bewertung von Abwärmepotenzialen hat sich eine systematische Herangehensweise bewährt, wie sie die Abwärmekaskade beschreibt (siehe Abbildung 18). Dabei werden Maßnahmen zur Vermeidung und Nutzung von Abwärme nach ihrer Umsetzbarkeit priorisiert und in entsprechender Rangfolge betrachtet.

Dem Prinzip „Efficiency first“ folgend, gilt es zunächst, die Entstehung von Abwärme zu vermeiden. Beispielsweise können zur Prozessoptimierung durch Zugabe spezieller Flussmittel die erforderlichen Schmelztemperaturen reduziert oder die erforderliche Schmelzenergie kann durch Einsatz vorkonditionierter Rohstoffe herabgesetzt werden. Der Einsatz von elektrischen Verfahren



Abbildung 18: Potenziale zur Vermeidung industrieller Abwärme entlang der Abwärmekaskade und typische Nutzungsmöglichkeiten für Abwärme. Quelle: dena

⁶⁴ UBA (2022b), S. 54, S. 60, S. 67

⁶⁵ UBA (2022b)

und von hocheffizienten Anlagen verringert den erforderlichen Energieeinsatz und gleichzeitig die Entstehung von Abwärme. Die Verwendung hochwertiger Ofenmaterialien ermöglicht die Akzeptanz höherer Wandtemperaturen, womit die Notwendigkeit einer Kühlung der Außenwände sinkt. Ansätze für besonders energieeffiziente Schmelzöfen sind in [Kapitel 3](#) beschrieben.

Für nicht vermeidbare Abwärme gilt es, sinnvolle Nutzungsmöglichkeiten zu finden. So gilt es, die durch den Schmelzprozess entstehende und im Rauchgas enthaltene Abwärme zunächst in Form einer maximalen Wärmerückgewinnung prozessnah zu nutzen, beispielsweise um die Eingangsstoffe vorzuwärmen. Hier bietet sich neben der häufig bereits praktizierten Vorwärmung der Verbrennungsluft auch die Vorwärmung des Brennstoffs (Erdgas) und des Gemenges an.

Zu den weiteren innerbetrieblichen Möglichkeiten der Abwärmenutzung gehören eine Abwärmeverstromung und eine thermische Kälteerzeugung. Verschiedene Ansätze zur Vermeidung und Nutzung der Abwärme können teilweise konkurrieren. Für ein schlüssiges Gesamtkonzept sind daher stets die konkreten Nutzungspotenziale anlagenspezifisch zu ermitteln.

4.2 Verbrennungsluftvorwärmung

Die Vorwärmung der Verbrennungsluft ist ein integraler Bestandteil des Schmelzprozesses und wird bereits bei der Konstruktion der Schmelzwanne mitgeplant. Die Wärmerückgewinnung wird über Regeneratoren oder Rekuperatoren durchgeführt. In beiden Fällen wird Wärmeinhalt der Rauchgase dazu genutzt, die Verbrennungsluft vorzuwärmen.

Die mögliche Wärmeaufnahme der Verbrenner-Zuluft liegt erheblich unter dem Wärmeinhalt der Rauchgase, da die Menge der Rauchgase größer als die Luftmenge ist und die spezifische Wärme von Rauchgasen erheblich höher liegt als die der Luft. In beiden Fällen wird bisher die Restabgaswärme im Normalfall nicht genutzt und mit den Rauchgasen emittiert.

Bei Regenerativsystemen ist es bei sehr großen Kammervolumen theoretisch möglich, die Lufttemperatur annähernd auf die Höhe der Eingangstemperatur des Abgases im Kammereintritt zu bringen. Nach erfolgter Wärmerückgewinnung ergibt sich eine noch verbleibende Abgastemperatur von über 400 °C. In der Praxis beträgt sie eher 500 °C.

Die in der Abgasreinigung zum Einsatz kommenden Filter erfordern einen bestimmten Temperaturbereich, der zu beachten ist. So muss das Abgas vor Eintritt in einen Elektrofilter von ca. 500 °C auf ca. 400 °C gekühlt werden. Höhere Temperaturen können damit nur vor dem Filter genutzt werden. Ein Hemmnis bei der Wärmerückgewinnung bilden die im Abgas enthaltenen Stäube, die die Wärmetauscher negativ beeinflussen. Hier können bewährte technische Lösungen wie selbstreinigende Wärmetauscher zum Einsatz kommen.

Nach dem Filter kann eine weitere Abwärmenutzung erfolgen. Bei Temperaturen unter ca. 200 °C kommt es zu Beeinträchtigungen des natürlichen Kaminzuges. Hier müsste mithilfe eines Gebläses die Abgasabführung gesichert werden. Eine Begrenzung der Abwärmenutzung stellt bei größeren Temperatursenkungen der Abgase auch eine Unterschreitung des Taupunktes (bei Erdgas unter ca. 120 °C) und eine Schädigung der korrosiven Bestandteile der Anlage durch Schwefelsäurebildung dar.⁶⁶

Bei Rekuperativsystemen ist die mögliche Luftvorwärmung zusätzlich beschränkt, weil das verwendete Material höhere Temperaturen auf der Luftseite nicht zulässt (bei Stahl-Rekuperatoren maximal 800 °C). In diesem Fall liegen die Abgastemperaturen zwischen 800 und 900 °C.

Steigende Energie- und CO₂-Preise können aus wirtschaftlicher Sicht eine angepasste Dimensionierung der Wärmerückgewinnung und eine Erhöhung der Wärmerückgewinnungsraten lohnender machen. Bei Einsatz einer Sauerstoffverbrennung (Oxy-Fuel) wird bislang regelmäßig auf die Nutzung einer Wärmerückgewinnung verzichtet, da die Abgas- und damit die Abwärmemengen bereits erheblich reduziert sind. Grundsätzlich kann auch der eingesetzte Sauerstoff vorgewärmt werden, was noch einmal zu einer Effizienzsteigerung des Schmelzprozesses führt.

⁶⁶ UBA (2022b)

4.3 Gemenge- und Scherbenvorwärmung

Da Gemenge und Scherben in der Regel kalt in die Schmelzwanne eingebracht werden, können durch ihre Vorwärmung mit Abgasen signifikante Energieeinsparungen realisiert werden. Technisch unterschieden wird die Scherben- von der Gemengevorwärmung. Letztere ist technisch herausfordernder, da sie Gefahren der „Verklumpung“ sowie der Feinpartikelmitnahme in sich birgt. Hierfür gibt es heute jedoch bereits ausgereifte technische Lösungen.

Die erzielten Vorwärmtemperaturen liegen überwiegend im Temperaturbereich von 275 bis 325 °C, bei guten Regenerativwannen bei 220 bis 240 °C. Die Vorwärmtemperaturen sollten jedoch 500 bis 550 °C nicht übersteigen, da ansonsten die Gemengebestandteile anfangen zu reagieren.⁶⁷



Abbildung 19: Praxisbeispiel für eine Gemengevorwärmung in der Behälterglasproduktion (350 tpd). Quelle: ZIPPE Industrieanlagen GmbH

Aktuell (Erfassung Oktober 2022) werden in acht Anlagen in Deutschland Gemengevorwärmung eingesetzt. Eine marktgängige Gemengevorwärmung benötigt eine Abgastemperatur von 450 bis 600 °C und ist bei Glasschmelzwannen mit mehr als 50 Prozent Scherben im Gemenge installierbar. Hierdurch kommt sie hauptsächlich in der Behälterglasindustrie zum Einsatz.

Mit diesem Temperaturband konkurriert die Gemengevorwärmung mit der direkten regenerativen Wärmerückgewinnung. Daher muss die Wirtschaftlichkeit im Einzelfall geprüft werden. Die erreichbare Energieeinsparung als Effekt der Gemengevorwärmung beträgt zwischen 10 und 15 Prozent. Für die Abwärmenutzung durch Gemengevorwärmung gibt es in Deutschland bereits gute Praxisbeispiele.

Die erreichbare Energieeinsparung durch Gemengevorwärmung beträgt zwischen

10 und 15 %



Best Practice

Durch eine Investition in Höhe von 3,4 Millionen Euro in die Gemengevorwärmung bei einer Wanne mit einer Kapazität von 450 tpd konnte der Durchsatz von 450 auf 500 tpd erhöht und es konnten Energiekosten von 1,1 Millionen Euro eingespart werden. Die Amortisationszeit betrug drei Jahre.⁶⁸



Best Practice

Die Ardagh Glass GmbH betreibt im Werk Nienburg eine Glaswanne zur Behälterglasherstellung. Neben der Abwärme zur Vorwärmung der Verbrennungsluft und einem Gemengevorwärmer wurde im Rahmen eines geförderten Projekts diffuse Abwärme zurückgewonnen und zur Scherbenvorwärmung verwendet. Neben einer Produktionsoptimierung konnten so durch die Energieeinsparungen 334 Tonnen CO₂ eingespart werden. Der Abschlussbericht des Projekts findet sich auf der [Website des Umweltinnovationsprogramms \(UIP\)](#).

⁶⁷ UBA (2022b), S. 79

⁶⁸ UBA (2022b), S. 81

4.4 Abwärmeverstromung

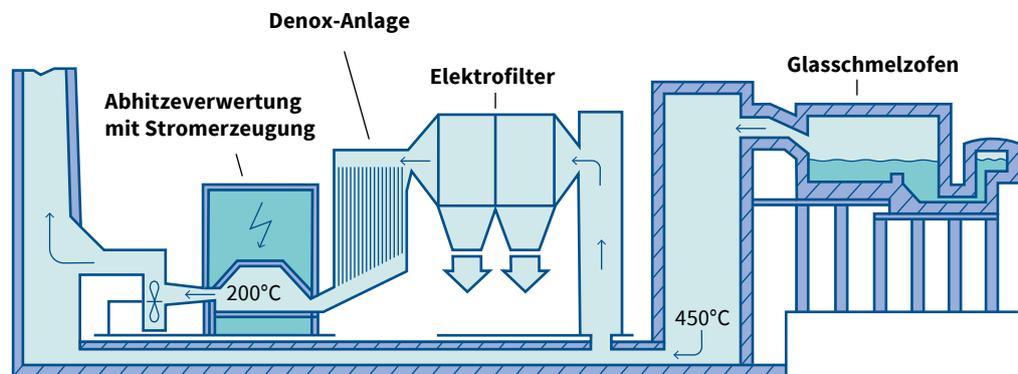


Abbildung 20: Abgasreinigung und Abwärmeverstromung einer Glasschmelzwanne. Quelle: Schaeffer und Langfeld (2014), S. 141

Die Technologie der Abwärmeverstromung besitzt einen hohen technischen Reifegrad und kann heute als Stand der Technik bezeichnet werden. Wie auch in großen Kraftwerken wird hier eine Flüssigkeit (z. B. Wasser) mit der anfallenden Abwärme unter Druck verdampft und anschließend einer Entspannungsmaschine (z. B. Turbine-Generator-Einheit) zur Stromerzeugung zugeführt. Abhängig vom Temperaturniveau und den sehr unterschiedlichen Leistungen von wenigen Kilowatt bis zu mehreren Megawatt kommen dafür verschiedene Technologien mit unterschiedlichen Wirkungsgraden zum Einsatz. Die Wärmeauskopplung zur Verstromung erfolgt in der Regel nach der Abgasbehandlung (siehe Abbildung 20).

Unterschieden werden die Verstromungsanlagen in KWK-fähige und Nicht-KWK-fähige Anlagen. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) können die anfallende Kondensationswärme nach der Stromerzeugung auf einem nutzbaren Niveau (in der Regel $>60\text{ °C}$) für andere Prozesse bereitstellen. Dadurch steigt der Gesamtnutzungsgrad der Abwärmenutzung von 5 bis 30 Prozent (rein elektrisch) auf bis zu 90 Prozent (elektrisch und thermisch). Bei Nicht-KWK-fähigen Anlagen wie zum Beispiel Niedertemperatur-ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle) hingegen ist eine nachgelagerte Wärmenutzung nur bedingt möglich.

Weitere Unterschiede der Technologien zur Abwärmeverstromung liegen im verwendeten Arbeitsmittel und dessen Treibhausgaspotenzial (Wasser oder organische Fluide), in der Art der Entspannungsmaschine (Turbine, Kolben- oder

Schraubenmotor) sowie im elektrischen Wirkungsgrad. Dieser liegt bei Niedertemperatur-Anlagen unter 10 Prozent, bei Hochtemperatur-Anlagen bei bis zu 40 Prozent.

Ab Leistungen von 500 kWth und Temperaturen von 80 °C bei flüssigen bzw. 200 °C bei gasförmigen Quellen lässt sich heute technisch und wirtschaftlich sinnvoll Abwärme verstromen. Höhere Abwärmemetemperaturen lassen den Umwandlungsgrad in Strom signifikant steigen.

Die Abwärmeverstromung innerhalb von Glaswerken erfolgt bisher hauptsächlich mittels Abhitzekeesseln. So waren im Jahr 2022 bundesweit elf Abhitzekeessel in der Glasindustrie in Betrieb.⁶⁹ Der dort erzeugte Dampf kann in einer Dampfturbine zur Stromerzeugung genutzt werden. Dazu werden Abgastemperaturen von 400 bis 1.000 °C benötigt. Damit eignet sich diese Art der Abwärmeverstromung anstelle eines Abkühlsystems vor Eintritt in den Filter.

Bei Schmelzanlagen mit Regenerativbrennern wird die Abwärme bereits zur Verbrennungsluftvorwärmung genutzt, was das Verstromungspotenzial einschränkt. Bei rekuperativ betriebenen Anlagen hingegen steht ein besonders hohes Temperaturgefälle zur Verfügung. Abhitzekeessel können auch bei Oxy-Fuel-Wannen erfolgreich eingesetzt werden.⁷⁰

Für eine Abwärmenutzung nach der Filterung und bei einem Abgastemperaturband von 200 bis 400 °C eignen sich ORC-Anlagen zur Stromerzeugung oder Wärmetauscher zur rein thermi-

⁶⁹ UBA (2022b), S. 83

⁷⁰ UBA (2022b), S. 75

schen Nutzung. Die Auskopplung der Abwärme darf auch im Störfall keinerlei Auswirkungen auf den Produktionsprozess haben. Mit modernen und bei Bedarf redundanten Systemen, die im Betrieb ohne Beaufsichtigung operieren, kann die Erfüllung dieser Anforderung sichergestellt werden.



Best Practice

Das italienische Unternehmen Zuccato Energia hat 2021 in Piacenza ein ORC-System für einen industriellen Prozess in Betrieb genommen. Die Glasfabrik produziert mit zwei modernen Schmelzöfen etwa 45.000 Tonnen Glas pro Jahr. Das realisierte System umfasst den Betrieb eines ORC-Moduls, das 1.400 kW Wärme aus den Abgasen des Ofens zurückgewinnt und bis zu 200 kW Strom erzeugt. Die Glashütte kann 376 Tonnen CO₂ pro Jahr vermeiden.⁷¹

Das spezifische Einsparpotenzial der Eigenstromerzeugung mit ORC liegt bei ca. 84 kWh/t Flachglas. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt (Stand 2022) wird ORC bundesweit an einer Anlage aktiv betrieben und die Technologie bewegt sich allmählich aus dem Status einer Nischentechnologie heraus.⁷²

4.5 Außerbetriebliche Abwärmenutzung

Falls im Unternehmen keine weitere wirtschaftliche Nutzung verbleibender Abwärme möglich ist, kann diese auch Dritten bereitgestellt werden. Bei dieser außerbetrieblichen Abwärmenutzung findet die Einsparung fossiler Energie nicht im eigenen Unternehmen, sondern außerhalb statt, beispielsweise bei der Wärmeversorgung von Wohngebäuden. Hier hilft sie, die steigenden Umwelтанforderungen im Gebäudebereich zu erfüllen. Als sogenannte nicht vermeidbare Abwärme aus der Industrie wird sie in den Regelwerken als CO₂-freie oder CO₂-arme Wärme eingestuft.

Für den Transport der Wärme wird eine Wärmetrasse beispielsweise zu einem kommunalen Fernwärmenetz oder eine eigene Verbindungsleitung zu einem Abnehmer benötigt. In günstigen Fällen kann das Werk mit einer Stichleitung an ein bereits vorliegendes Fernwärmenetz des Energieversorgers angebunden werden. In Einzelfällen ist auch ein mobiler Transport sinnvoll. Hierzu wird ein Latentwärmespeicher geladen und mithilfe spezieller Lkws zu einer Wärmesenke transportiert, zum Beispiel einem kommunalen Schwimmbad.

Die Komplexität der Vorhaben erfordert häufig eine Machbarkeitsstudie, um die technischen und wirtschaftlichen Belange

Tipp: Die Besondere Ausgleichsregelung (BesAR) ist durch die Abwärmeverstromung nicht gefährdet. Zwar sinkt die tatsächliche Stromkostenintensität für das Produkt, jedoch werden die fiktiven Kosten, die maßgeblich für die Privilegierung sind, aus der Summe an netzbezogener und eigenproduzierter elektrischer Energie mit dem branchenüblichen Preis berechnet. Die Stromkostenintensität im Sinne der BesAR bleibt dadurch unverändert.



Innovation

Eine besonders innovative Technologie steht mit dem Einsatz thermoelektrischer Generatoren (TEG) zur Verfügung. Sie wandeln auf Basis des sogenannten Seebeck-Effekts einen Wärmestrom direkt in elektrische Energie um. Obwohl die Glasindustrie große Anwendungsfelder für den Einsatz von TEG bietet, steht der Durchbruch dieser Technologie noch aus.

genauer zu beleuchten. Wichtig für den Wert der Abwärme ist ihre garantierte Verfügbarkeit. Ebenfalls zentral ist eine vertrauensvolle Zusammenarbeit der Unternehmen mit den eingebundenen Energiedienstleistern bzw. Kommunen. Maßnahmen zur externen Abwärmenutzung werden besonders gefördert (siehe [Kapitel 6](#)).



Best Practice

In Kleintettau im Landkreis Oberfranken wird mit bisher ungenutzter Abwärme der Glashütte Heinz Glas eine Gewächshausanlage mit 3.500 m² Fläche beheizt. Das Referenzprojekt soll zeigen, wie tropische Nutzpflanzen und Speisefische unter wirtschaftlichen Bedingungen in Deutschland erzeugt werden können. Lange Transportwege mit hohen Schadstoffemissionen entfallen. Weitere Informationen finden sich auf der [Website des Projekts](#).

⁷¹ Morris (2021)

⁷² UBA (2022b), S. 82



05

QUERSCHNITTS- TECHNOLOGIEN

In den einzelnen Produktionsschritten der Glasherstellung kommen neben branchenspezifischen Verfahren auch branchenunabhängige Technologien zum Einsatz. Sie können in Summe einen nennenswerten Anteil am gesamten Energieverbrauch eines Unternehmens ausmachen und durch Energieeffizienzmaßnahmen energetisch optimiert werden. Dies betrifft insbesondere den Einsatz von elektrischen Motoren und Antrieben sowie von Pumpen und Ventilatoren, aber auch Anlagen zur Wärmerückgewinnung, Druckluftheizer und Beleuchtungssysteme.

Die Energieeffizienz wurde hier in den letzten Jahren so gesteigert, dass ein vorzeitiger Austausch und Ersatz bestehender Technologien wirtschaftlich sinnvoll sein kann. Im Gegensatz zu einem Wechsel des Energieträgers bestehen bei Querschnittstechnologien und einer verbesserten Abwärmenutzung auch in Bestandsanlagen erhebliche Potenziale für Effizienzsteigerungen.

5.1 Motoren und Antriebssysteme

Elektrische Motoren werden in der Glasindustrie vielfältig eingesetzt: als Antrieb für Förderanlagen, Pumpen, Kompressoren und Lüftungen. Sie unterscheiden sich dabei in Bauform und Leistung.

Um die Investitionskosten niedrig zu halten, wurden in der Vergangenheit oftmals weniger effiziente Antriebe eingesetzt. Durch die höheren Betriebskosten werden diese anfänglichen Kosteneinsparungen allerdings häufig überkompensiert. Hier lohnt es sich, einen vorzeitigen Austausch oder die Nachrüstung einer effizienteren Regelungstechnik zu prüfen. Dies gilt insbesondere bei Anlagen mit größeren Leistungen und hohen jährlichen Betriebsstunden.

Elektrische Antriebe verfügen häufig über ein wirtschaftliches Energieeffizienzpotenzial von 30 Prozent und mehr.⁷³ Zur systematischen Verringerung des Stromverbrauchs ist eine Betrachtung des gesamten Antriebssystems sinnvoll, da hier der Gesamtwirkungsgrad entscheidend ist. Dieser berechnet sich durch die Multiplikation der Teilwirkungsgrade der einzelnen Antriebskomponenten: Elektromotor, Blindleistungskompensation, Kraftübertragung, Arbeitsmaschine sowie Steuerung und Regelung (siehe Abbildung 21).

Die Ökodesign-Anforderungen für Antriebssysteme, Motorstarter, Leistungselektronik und die von ihnen angetriebenen Geräte werden in der internationalen Norm IEC 61800-9 beschrieben. Um zu ermitteln, wie effizient das gesamte Antriebssystem ist, wird die Klassifizierung International Efficiency of Systems (IES) verwendet. Zum Beispiel umfasst ein Power Drive System (PDS) in einem Kompressor sowohl den Frequenzumrichter als auch den Motor des Geräts. Dieses Gesamtsystem wird in Bezug auf die Energieeffizienz in eine IES-Klasse eingeordnet.

⁷³ dena (2013), S. 5

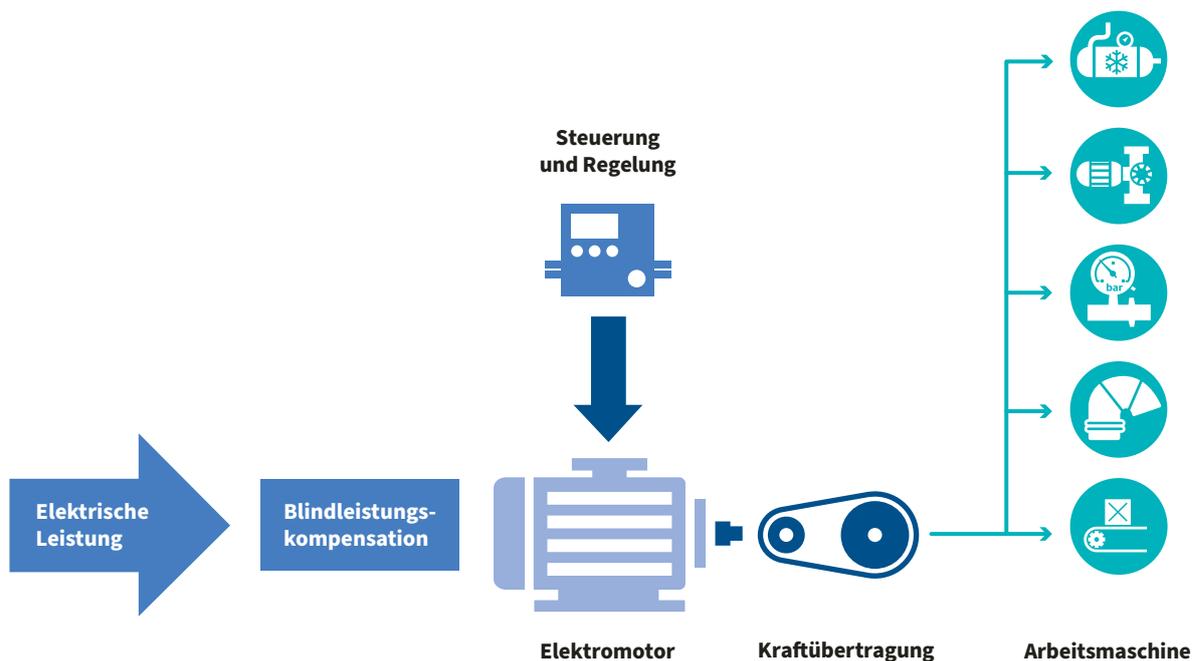


Abbildung 21: Komponenten eines elektrischen Antriebs. Quelle: dena

Für Elektromotoren und Drehzahlregelungen bestehen für alle Hersteller und Lieferanten, die ihre Produkte in der EU verkaufen möchten, verbindliche Ökodesign-Vorschriften. Diese gesetzlichen Mindestvorgaben an die Energieeffizienz sind abhängig von der Bauart, der Nennausgangsleistung und der Polzahl der Motoren.

Tipp: Oft werden Motoren nicht bedarfsgerecht betrieben. Dies liegt häufig an zu hohen Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung, einer fehlenden Leistungssteuerung für den Teillastbetrieb oder vermeidbaren Leerlaufphasen. Die Folgen sind ein unnötig hoher Energieverbrauch und hohe Betriebskosten. Hier können ein Frequenzumrichter und eine bedarfsgerechte Steuerung entgegenwirken.

5.2 Lüftungssysteme

Aufgrund der hohen Temperaturen bei der Schmelze besteht in der Glasherstellung ein hoher Lüftungs- und Klimatisierungsbedarf zum Schutz vor Überhitzung der Arbeitsbereiche sowie der Schmelzöfen. So erfolgt die Temperaturbegrenzung der Außenseite der Schmelzöfen durch Regelung des Abluftstroms, angetrieben durch Ventilatoren mit dreiphasigen Asynchronmotoren.

Zusätzliche Absaugungen sorgen für die Reduzierung von Schadstoff- und Staubbelastung in der

Fabrikation. Einen wesentlichen Ansatzpunkt zur Energieeffizienzsteigerung im Gesamtsystem stellt der Ventilator dar. Auch die eingesetzten Luftkanäle, Formteile, Filter und weiteren Komponenten der Anlage sind relevant für den Energieverbrauch, denn sie setzen der Luftbewegung Widerstände entgegen. Insofern wirken sich Maßnahmen zur Reduzierung des Gesamtwiderstands und des Luftvolumenstroms unmittelbar auf den Energieverbrauch des Absaugungssystems aus und können die Betriebskosten maßgeblich senken.

Strömungstechnisch betrachtet ist die Verwendung von Rohren mit kreisförmigem Durchmesser (Wickelfalzrohre) vorteilhaft.

Die Solltemperatur der Luft in den Produktionsräumen liegt im Allgemeinen zwischen 20 und 26 °C, abhängig von der Produktion. Eine Beheizung der Produktionsräume und eine Warmwasserbereitung können mit der Abwärme der Glasschmelze erfolgen. In den heißeren Sommermonaten ist gegebenenfalls eine Klimatisierung zur Verhinderung von Überhitzungen erforderlich. Die Kälteerzeugung erfolgt mit Kältemaschinen (siehe [Abschnitt 5.3](#)). Ein Großteil des Jahres reicht die Temperatur der Außenluft (Wert unter 12 °C) für eine natürliche Kühlung.

Tipp: Warme Abluft aus der Produktion wird in der Regel ungenutzt abgeleitet (siehe [Kapitel 4](#)). Das Energieeinsparpotenzial durch Einsatz hocheffizienter Motoren bei Lüftung und Klimatisierung liegt bei mindestens 10 Prozent. Folgende Energieeffizienzmaßnahmen können zusätzlich getroffen werden:

- Optimierung der Steuerung und Regelung durch Einsatz von Automatisierungstechnik
- Einsatz von Frequenzumrichtern, vor allem bei Teillastbetrieb
- Optimierung der Luftkanäle durch Reduzierung der Strömungswiderstände
- Nutzung der Abwärme zum Beispiel zur Beheizung weiterer Flächen und Räume

5.3 Kälteerzeugung

Für die Kühlung von Schmelzwanne, Formgebung und Luftkompressoren sowie für die Klimatisierung wird Kälteenergie benötigt. Die Kälteerzeugung findet meist dezentral für die einzelnen Produktionslinien statt. Die Kälteversorgung erfolgt häufig über Kaltwasser mit einer Vorlauftemperatur von zum Beispiel 7 °C und einer Rücklauftemperatur von 12 °C. Um auch im Falle einer Störung eine ausreichende Kälteleistung zu sichern, kann neben der Kälteerzeugung für Grundlast- und Spitzenlastabdeckungen eine Anlage zur Sicherheit im „Cold Standby“ (statische Redundanz) gehalten werden.

Für eine Optimierung müssen das benötigte Temperaturniveau sowie die erforderliche Kälteleistung der einzelnen Verbraucher der Prozesskühlung ermittelt werden. Zentralisierte leistungsstarke Kälteerzeugungen ermöglichen oft den wirtschaftlichen Einsatz von besonders effizienten Kälteerzeugern wie drehzahlregulierten Turboverdichtern (Centrifugal Liquid Chillers). Aufgrund der Wechselwirkung einzelner Komponenten und Parameter ist für eine energetische Optimierung das kältetechnische Gesamtsystem zu betrachten.

Kennzeichnend für die Energieeffizienz ist das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Diese Leistungs-

zahl wird bei der Kälteerzeugung als Coefficient of Performance (COP) oder Energy Efficiency Ratio (EER) bezeichnet. Zur Optimierung der Leistungszahlen in Kältesystemen sind eine möglichst tiefe Verflüssigungstemperatur und eine hohe Verdampfungstemperatur anzustreben, damit bei kleinen Temperaturdifferenzen eine hohe Energieeffizienz erreichbar ist. Im Bereich der Klimatisierung mit geringer Differenz zwischen der Temperatur der gekühlten Luft und der Umgebung sind Leistungsziffern bis 7 möglich.

Die Kühlaggregate werden vorrangig in der warmen Jahreszeit betrieben, ein Vollastbetrieb erfolgt meist nur in den Sommermonaten. Da mit Leistungszahlen (COP) nur ein Vergleich unter den jeweils momentanen Bedingungen möglich ist, helfen sogenannte Arbeitszahlen. Unter Berücksichtigung der saisonalen Bedarfsschwankungen sind bei Kälteanlagen vor allem die Jahresarbeitszahlen (JAZ) relevant. Mit ihnen kann über einen längeren Zeitraum die genutzte Kühlenergie in kWh mit dem Verbrauch an elektrischer Energie in kWh verglichen werden. Die Arbeitszahlen können durch Messungen mit einem Wärmezähler und einem Elektro-Energiezähler bestimmt werden.

Neben der Energieeffizienz ist bei Kälteanlagen auch das Treibhauspotenzial (GWP) des eingesetzten Kältemittels zu beachten.

Tipp: Als Kältemittel werden häufig noch fluorierte Gase eingesetzt. Sie besitzen eine tausendfach höhere Treibhausgaswirkung als CO₂ und sollen gemäß der „EU-Verordnung über fluorierte Treibhausgase“ bis 2030 schrittweise um 70 Prozent gegenüber 1990 gesenkt werden. Für Unternehmen liegen wirksame Sofortmaßnahmen zur Senkung des GWP in der Prüfung und consequenten Verbesserung von Bestandsanlagen, um die Menge für Nachfüllungen zu minimieren. Auch kommt es darauf an, gebrauchte HFKW (teilfluorierte Kohlenwasserstoffe) rückzugewinnen und aufzubereiten. Sinnvoll sind zudem die Umrüstung auf umweltfreundlichere Kältemittel und der Einsatz natürlicher Kältemittel bei allen Neuanlagen.

Für die Wärmeabfuhr wird das Wasser durch einen Kühlturm geleitet, der sich häufig auf dem Dach der Produktionsstätte befindet. Ausreichend dimensionierte Hybridkühler und der Einsatz von Leistungspuffern ermöglichen, dass sie bei Nennlast bis zu einer Außentemperatur von ca. 20 °C trocken betrieben werden können. Somit entstehen über dem Gebäude keine Wasserdampfschwaden durch Verdunstungskühlung und die Aufbereitungsmenge von Kühlwasser kann reduziert werden.

Ein wichtiger Hebel für Optimierungen ist auch die Kälteverteilung. Energieverluste entstehen durch Verteilungen, deren Länge je nach Produktionslinie mehrere hundert Meter betragen kann. Hier sollte regelmäßig die Qualität der Isolierung überprüft werden. Eine energetische Bewertung der Umwälzpumpen der Kälteverteilung erfolgt in [Abschnitt 5.4](#). Darüber hinaus ist im Einzelfall auch eine mögliche Energieeffizienzsteigerung durch Dezentralisierung der Kälteerzeugung zu überprüfen.

Zusätzliche Ansatzpunkte für Optimierungen ergeben sich durch bedarfsabhängige Regelungen für die Spitzenlast oder die Optimierung von Antrieben wie Motoren oder Pumpen. Drehzahlgeregelte Kälteerzeugungen erreichen die größte Energieeffizienz im Teilleistungsbereich von 40 Prozent. Potenziale können aber auch im Einsatz eines Kältespeichers zur Verringerung der Schaltzyklen liegen sowie in der Verringerung der Kühlwasserverluste durch den Einsatz einer trockenen Kühlung.

Neben Kompressionskälteanlagen werden in der Industrie auch Absorptionskältemaschinen sowie Adsorptionsanlagen eingesetzt, die je nach Anwendungsfall geeignete Ersatztechnologien für Kompressionsanlagen darstellen. Der sinnvolle Einsatz thermischer Kältemaschinen setzt die Verfügbarkeit CO₂-armer und kostenloser Wärme voraus, wie etwa bei der Nutzung der Abwärme von Schmelzöfen.

Tipp: Investitionen in effiziente Kältetechnik können im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative durch das Förderprogramm der „Kälte- und Klimaanlagen“ gefördert werden.

Tipp: Durch Kombination verschiedener Maßnahmen ergeben sich bei Kälteanlagen oft hohe Energieeinsparpotenziale. Nähere Informationen zu den Einsparpotenzialen finden sich in der UBA-Studie „[Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie](#)“.⁷⁴

⁷⁴ UBA (2014)

5.4 Pumpensysteme

In der Glasproduktion kommen eine Reihe leistungsstarker Umwälzpumpen zum Einsatz, um das Kühlwasser von den Kältemaschinen zu den Verbrauchergruppen zu transportieren. Hierzu zählen die Klimatisierung der Zuluft der Produktionsstätten sowie die Kühlung der Glaswannen und Ziehmaschinen.

Maßgeblich für die Effizienz der Pumpen ist die Energieeffizienz der Motoren (siehe Kapitel 5.1). Einsparpotenziale ergeben sich durch den Einsatz hocheffizienter Pumpen. Neben der Effizienz der Motoren ist eine bedarfsabhängige Regelung entscheidend, um Einsparpotenziale zu nutzen. Bei wechselnden Belastungen mit Teillastverhalten können Frequenzumrichter zur Regelung der Drehzahl eingesetzt werden. Allein durch die Optimierung der Regelung von Pumpensystemen können schätzungsweise durchschnittlich 35 Prozent des Energieverbrauchs eingespart werden.

Energieeffizienzpotenziale bestehen in nahezu jedem Pumpensystem. Pumpensysteme können bei schlechter Wartung bis zu 15 Prozent an Wirkungsgrad verlieren.⁷⁵ Dies kann unterschiedliche Ursachen haben, etwa Korrosion und Ablagerungen in Rohrleitungen, undichte Armaturen, zugesetzte Filter oder ein Komponentenaustausch ohne anschließende Neuberechnung der Anlagenauslegung.

Gut aufeinander abgestimmte Systembestandteile sind das Schlüsselement für geringe Gesamtkosten. Energieeffizienzmaßnahmen sollten zunächst dort vorgenommen werden, wo sie die größte Wirkung erzielen, etwa beim Rohrleitungssystem. Schrittweise arbeitet man sich dann zum Anfang der Systemkette vor, bis hin zum Antriebsmotor bzw. zur Regelung.

Zudem sollten die spezifischen Energieverbräuche (in kWh/m³ Fördervolumen) systematisch erfasst und der Einsatz der Pumpen sollte kontinuierlich überprüft und hinsichtlich der Möglichkeiten zur Leistungsreduktion untersucht werden.

Durch die Optimierung der Regelung von Pumpensystemen können durchschnittlich

35%

des Energieverbrauchs eingespart werden.

5.5 Druckluftsysteme

Druckluft kommt in vielen Produktionsbereichen und Verfahren der Glasherstellung zum Einsatz und benötigt für ihre Bereitstellung viel Energie. Die Anwendungen betreffen sowohl Steuerluft (z. B. bei pneumatischen Antrieben) als auch Förderluft (z. B. beim Sortieren von Scherben, Gemenge) oder die Kühlung. Wenn die Druckluft bei verschiedenen Produktionsverfahren direkt mit dem Produkt in Kontakt kommt, bestehen besonders hohe Qualitätsanforderungen.

Tipp: Eine empfehlenswerte Lektüre zum Thema Druckluftaufbereitung, Druckluftreinheit und Druckluftreinheitsmessungen (ISO 8573) sowie zu ausgewählten Druckluftanwendungen ist die VDMA-Einheitsblattserie 15390. Als anerkanntes technisches Regelwerk kann die Einheitsblattserie auch als technisches Bezugsdokument herangezogen werden, um den Stand der Technik und dessen Einhaltung nachzuweisen.⁷⁶

⁷⁵ dena (2013), S. 5

⁷⁶ VDMA (2014)

Bei Druckluftsystemen bestehen wirtschaftliche Energieeinsparpotenziale von mehr als

30%

Im Rahmen einer Studie für die EU wurde aufgezeigt, dass durch die Kombination verschiedener Optimierungsmaßnahmen bei Druckluftsystemen wirtschaftliche Energieeinsparpotenziale von mehr als 30 Prozent bestehen.⁷⁷

Entsprechend bietet die Erneuerung bzw. Optimierung der Druckluftanlage inklusive Abwärmeeinnutzung ein sehr großes Potenzial zur Energieeinsparung. Zunächst sollten die Verbraucher, die Druckluft nutzen, identifiziert und im Hinblick auf die Parameter Druck sowie Druckluftmenge und -qualität bewertet werden. Danach können die Systemkomponenten bestmöglich auf die Verbraucher eingestellt und das System kann als Ganzes optimiert werden.

Zur Druckluftherzeugung wird Luft über einen Filter angesaugt und energieaufwendig verdichtet. Mitentscheidend für die Energieeffizienz einer Druckluftherzeugung ist die Energieeffizienz der eingesetzten Motoren, die etwa in einem Schraubenkompessor zum Einsatz kommen. Insbesondere bei längeren Laufzeiten lohnt sich der Einsatz von Motoren der höchsten Effizienzklasse IE3 oder IE4 (siehe Kapitel 5.1).

Rund 90 Prozent der elektrischen Antriebsenergie von Druckluftkompressoren fallen in Form von Abwärme an. Diese Abwärme beträgt je nach Art des Kompressors zwischen 60 und 110 °C und kann

nutzbar gemacht werden. Sie lässt sich in das Heizsystem einspeisen oder für die Trinkwassererwärmung verwenden.

Abhängig von den Produktionslinien ergeben sich in der Praxis Leitungslängen von mehreren hundert Metern mit entsprechend hohen Druckverlusten. Um einen Druckabfall im Netz zu verringern und auf diese Weise Materialabtrag und unnötig hohen Energieverbrauch zu vermeiden, sollte auf folgende Aspekte geachtet werden:

1. Leckagen identifizieren und beseitigen
2. Ablagerungen beseitigen
3. Kurze Wege: Ringleitungen statt Sternverteilung
4. Übermäßig viele Rohrbiegungen vermeiden
5. In großzügig dimensionierten Leitungen rostfreie Werkstoffe verwenden

Zusätzlich zu den oben genannten Aspekten sollten selbstlüftende Schnellkupplungen vermieden werden, da diese Druckverluste von 0,6 bis 1,3 bar Fließdruck verursachen. Moderne Kupplungen nach dem Prinzip eines Kugelhahns reduzieren diese Verluste auf ca. 0,2 bar.

⁷⁷ Radgen (2004)

5.6 Beleuchtungssysteme

Der Anteil der Beleuchtung am Gesamtstromverbrauch beträgt bei Industrieunternehmen im Durchschnitt nur 4 bis 5 Prozent.⁷⁸ Allerdings können hier Energieeffizienzmaßnahmen während des Betriebs und mit kurzen Amortisationszeiten umgesetzt werden.

Der Energieverbrauch lässt sich durch den Einsatz hocheffizienter Leuchtmittel wie LED-Lampen deutlich reduzieren. Die Optimierung einer Beleuchtungsanlage erzielt dann das beste Ergebnis, wenn möglichst alle Komponenten einbezogen werden: in der Lichtlenkung optimierte Leuchten, Lampen mit hoher Lichtausbeute, elektronische Vorschaltgeräte mit hohen Wirkungsgraden, intelligente Lichtsteuerung sowie eine optimale Tageslichtnutzung.

Im Industriebereich spielt neben der Lichtleistung die Lebensdauer der Leuchtmittel eine große Rolle. Diese wird stark von der Umgebungstemperatur beeinflusst. Hohe Temperaturen wirken sich insbesondere auf die Leuchtkraft und die Steuerungselektronik der Leuchte negativ aus. Spezielle LED-Leuchten sind dagegen auch für den Hochtemperatureinsatz in der Glasindustrie konzipiert. Beispielsweise können Hochtemperaturleuchten für die Hallenbeleuchtung eine Lebensdauer von 50.000 Stunden aufweisen und damit herkömmliche Beleuchtungssysteme wie Halogen-Metall-dampflampen (HQL-Leuchten) oder Quecksilberdampflampen (HQL) ersetzen (siehe Tabelle 5). Werden alle Potenziale einer technischen Umrüstung voll ausgeschöpft, lassen sich innerhalb des Beleuchtungssystems Energie- und Kosteneinsparungen von bis zu 70 Prozent erzielen.⁷⁹

Leuchtentyp	Typische Leistungsaufnahme
Hochtemperatur-LED-Leuchten	150 Watt
HQL-Leuchten	400 Watt
HQL-Leuchten	600 Watt

Tabelle 5: Elektrische Leistung verschiedener Beleuchtungssysteme. Quelle: eigene Recherche

Aufgrund der extremen Bedingungen an den Schmelzöfen muss die Beleuchtung neben Hitze zusätzliche Belastungen wie Staub oder Feuchtigkeit aushalten. Oft zögern Unternehmen angesichts dieser Produktrisiken, die entsprechenden Investitionen zu tätigen. Doch auch für anspruchsvolle Einsatzbereiche sind innovative Produkte und Lösungen vorhanden. LED-Industrieleuchten sind robust und für Umgebungstemperaturen von bis zu 70 °C ausgelegt.



Best Practice

Bei Pilkington Automotive, einem Spezialisten für Autoverglasung, werden im Lagerbereich cloud-basierte, drahtlos vernetzte LED-Lichtbandsysteme eingesetzt. Die Beleuchtungen werden mittels Präsenzsensoren und tageslichtabhängiger Steuerung bedarfsgerecht geregelt, mit Energieeinsparungen von 50 Prozent. Damit kann auch der CO₂-Fußabdruck um 290 Tonnen im Jahr reduziert werden. Zusätzlich unterstützen die intelligenten Leuchten die Optimierung der Lagerlogistik und der Betriebsprozesse.

Innerhalb des Beleuchtungssystems lassen sich Energie- und Kosteneinsparungen von bis zu

70%
erzielen.

⁷⁸ Statista (2014)

⁷⁹ dena (2014), S. 4

06

FINANZIELLE FÖRDERUNG

Investitionen zum Ersatz oder zur Neuanschaffung von hocheffizienten Anlagen bzw. Aggregaten für die industrielle und gewerbliche Anwendung sind in der Regel förderfähig. Für die Unterstützung von Transformationsprozessen in Unternehmen gibt es eine Vielzahl an Fördermöglichkeiten. Einen Überblick über die Förderprogramme des Bundes, der Länder und der Europäischen Union bietet die [Förderdatenbank](#) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), in der die relevanten Programme aufgeführt sind. Eine Auswahl relevanter Programme des Bundes wird nachfolgend beschrieben.

Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (EEW)

Die BMWK-Förderrichtlinie „Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (EEW)“ stellt fünf Fördermodule zur Verfügung (siehe Abbildung 22).

Gefördert werden energieeffiziente Querschnittstechnologien, Maßnahmen zur Prozesswärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien, der Einsatz von Mess-, Steuer- und Regelungstechnik und Energiemanagement-Software sowie Maßnahmen zur energiebezogenen Optimierung von Anlagen und Prozessen (technologieoffene Förderung von Maßnahmen zur CO₂-Reduktion). Bezuschusst wird auch die Erstellung eines Transformationskonzepts, das eine langfristige Dekarbonisierungsstrategie für einen oder mehrere Standorte eines Unternehmens oder einer Gruppe von Unternehmen oder Unternehmensstandorten umfasst.



Abbildung 22: Die fünf Module der Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft. Quelle: dena

Bei den Modulen 1, 3 und 4 beträgt der Fördersatz jeweils 30 Prozent. Bei Maßnahmen zur außerbetrieblichen Abwärmenutzung beträgt der Fördersatz 40 Prozent. Prozesswärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien wird mit 45 Prozent der förderfähigen Investitionsausgaben gefördert. Kleine und mittlere Unternehmen erhalten zusätzlich einen Bonus in Höhe von 10 Prozent auf die förderfähigen Kosten. Die Förderung ist bei Querschnittstechnologien auf 200.000 Euro pro Vorhaben begrenzt, in den anderen Modulen auf maximal 15 Millionen Euro pro Vorhaben. Die Förderung von Transformationskonzepten beträgt bis zu 50 Prozent der förderfähigen Kosten, maximal jedoch 80.000 Euro pro Vorhaben.

Bei der zu beantragenden Förderung steht entweder ein direkter Investitionszuschuss beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) oder ein Kredit mit Tilgungszuschuss bei der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) zur Wahl.

Tipp: Praktische Hinweise zur Bundesförderung Energieeffizienz, eine Informationsgrafik zu diesem Förderprogramm sowie eine Arbeitshilfe zur Ermittlung der förderfähigen Investitionsausgaben finden sich auf der [dena-Projektwebsite Leuchttürme CO₂-Einsparung](#).

Förderwettbewerb Energie- und Ressourceneffizienz

Eine weitere Förderoption bietet der Förderwettbewerb, über den ebenfalls direkte Investitionszuschüsse ausbezahlt werden. Der Förderwettbewerb beinhaltet die gleichen Fördertatbestände, bietet aber die Chance auf einen höheren Fördersatz. Dieser kann bei bis zu 60 Prozent liegen. Die Förderentscheidung orientiert sich an der sogenannten Fördereffizienz als Wettbewerbskriterium. Je höher die Einsparung und je geringer die beantragte Förderung ist, desto höher ist die Chance, innerhalb einer Wettbewerbsrunde zu den geförderten Projekten zu gehören. Die Höhe der Förderung ist auf maximal 10 Millionen Euro pro Vorhaben begrenzt.

Bundesförderung Dekarbonisierung in der Industrie

Mit der Bundesförderung „Dekarbonisierung in der Industrie“ werden Projekte im Bereich der energieintensiven Industrien gefördert. Sie haben zum Ziel, prozessbedingte Treibhausgasemissionen, die nach heutigem Stand der Technik nicht oder nur schwer vermeidbar sind, weitgehend und dauerhaft zu reduzieren. Gefördert werden sowohl die Erforschung und Entwicklung, Erprobung und Demonstration als auch Investitionen in entsprechende innovative Klimaschutztechnologien. Das Programm richtet sich insbesondere an die Stahl-, Chemie-, Zement-, Kalk- und Nichteisenmetallindustrie, aber auch an die Glasindustrie. Gefördert wird über Zuschüsse mit bis zu 50 Prozent der förderfähigen Kosten. KMU können unter bestimmten Voraussetzungen einen Bonus erhalten. Projektträger ist das Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI) der Zukunft – Umwelt – Gesellschaft (ZUG) gGmbH.

Wasserstoff-Förderprogramme

Die Europäische Kommission und die Bundesregierung unterstützen den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft. Die Förderung von Investitionen in Wasserstofftechnologien und -systeme für Erzeugung und Infrastruktur werden unter anderem durch die IPCEI (Important Projects of Common European Interest) Wasserstoff gefördert. Darüber hinaus werden internationale Wasserstoffprojekte unter anderem durch die Förderrichtlinie „Internationale Wasserstoffprojekte“ (mit dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF), das Programm H₂ Global und das International Hydrogen Ramp-up PPP Program (H₂-Uppp) gefördert. Im Rahmen des EU-Innovationsfonds „Innovation Fund Large Scale Projects – Innovative Electrification in Industry and Hydrogen“ können Vorschläge für Großprojekte eingereicht werden, die innovative Elektrifizierung sowie Wasserstoffherzeugung und -nutzung in der Industrie entwickeln.

Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW)

Die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) ist das zentrale Förderprogramm für den Ausbau der leitungsgebundenen Wärme. Investitionen zur Integration von Abwärme in Wärmenetze sind als Teil eines Transformationsplans bzw. einer Machbarkeitsstudie in Kombination mit der Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft (EEW) förderfähig. Förderfähig sind Investitionen in Anlagen zur Abwärmenutzung, die Eigentum des Wärmenetzbetreibers sind. Investitionen in Anlagen zur Abwärmenutzung, die Eigentum des Abwärme auskoppelnden Unternehmens sind, sind nur nach der EEW förderfähig. Anträge können bei der Bewilligungsbehörde über die Internetseite des BAFA gestellt werden.

KfW-Energieeffizienzprogramm – Produktionsanlagen/-prozesse (Kredit 292)

Das Programm fördert Investitionsmaßnahmen, die eine Endenergieeinsparung von mindestens 10 Prozent erzielen. Die Neu- und Modernisierungsinvestitionen werden mit Krediten bis zu 25 Millionen Euro gefördert. Der Zinssatz wird unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Verhältnisse des Kreditnehmers (Bonität) und der Werthaltigkeit der gestellten Sicherheiten festgelegt. Die Kredite sind bei der jeweiligen Hausbank (Geschäftsbank, Sparkasse oder Genossenschaftsbank) zu beantragen.

Literaturverzeichnis

BAFA – Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2021): Informationsblatt CO₂-Faktoren. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2021.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

Biebl, Marcel; Islami, Bledar; Giese, Anne; Fleischmann, Bernhard; Nelles, Christiane; Overath, Johann (2021): Wasserstoffnutzung in der Glasindustrie als Möglichkeit zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und des Einsatzes erneuerbarer Gase – Untersuchung der Auswirkungen auf den Glasherstellungsprozess und Analyse der Potenziale in NRW (Akronym: HyGlass). <https://www.bvglas.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2514&token=69553e2ada72ffc160a9ebce8174bfcedf2870ec>, Zugriff am: 19.12.2022.

BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2021): Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. Ausgabe 2021. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2022): Bundes-Klimaschutzgesetz. <https://www.bmu.de/themen/klimaschutz-anpassung/klimaschutz/bundes-klimaschutzgesetz>, Zugriff am: 19.12.2022.

BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022): Das passende Förderprogramm für Unternehmen finden. <https://www.energiewechsel.de/KAENEF/Navigation/DE/Foerderprogramme/Unternehmen/unternehmen.html>, Zugriff am: 19.12.2022.

BV Glas (2021): Jahresbericht 2020. https://www.bvglas.de/media/Facts_and_figures_Jahresberichte/Jahresbericht_BVGlas_2020.pdf, Zugriff am: 19.12.2022

BV Glas (2022): Die Deutsche Glasindustrie auf einen Blick: 2020 und 2021. https://www.bvglas.de/media/Facts_and_figures_Jahresberichte/Ueberblick_Glasindustrie.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

Conradt, Reinhardt (2003): Zusammenhang zwischen dem theoretischen Wärmebedarf der Reaktion Gemenge, Schmelze und dem minimalen Wärmebedarf eines Schmelzaggregates. HVG-Mitteilung Nr. 2037. <http://www.hvg-dgg.de/fileadmin/dateien/hvgm/2001/2037%20Conradt%20Waermebedarf.pdf>, Zugriff am: 19.12.2022.

DEHSt – Deutsche Emissionshandelsstelle (Hrsg.) (2021). Treibhausgasemissionen 2021. Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2020). <https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2020.pdf>, Zugriff am: 19.12.2022.

DEHSt (2022): Nationalen Emissionshandel verstehen. https://www.dehst.de/DE/Nationaler-Emissionshandel/nEHS-verstehen/nehs-verstehen_node.html, Zugriff am: 19.12.2022.

dena – Deutsche EnergieAgentur (2013): Ratgeber Pumpen und Pumpensysteme. In: dena (Hrsg.), Handbuch energieeffiziente Querschnittstechnologien. Berlin.

dena – Deutsche EnergieAgentur (2014): Ratgeber Beleuchtung. In: dena (Hrsg.), Handbuch energieeffiziente Querschnittstechnologien. Berlin

dena – Deutsche Energie-Agentur (2019): biogaspartner – gemeinsam einspeisen. Biogaseinspeisung und -nutzung in Deutschland und Europa. Markt, Technik, Akteure. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/biogaspartner_-_gemeinsam_einspeisen.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

dena – Deutsche Energie-Agentur (2021) (Hrsg.): Marktmonitoring Bioenergie – Kurzbefragung zur Einschätzung der aktuellen Geschäftslage. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/dena-ANALYSE_Marktmonitoring_Bioenergie.pdf, Zugriff am: 18.12.2022.

dena – Deutsche Energie-Agentur (2022) (Hrsg.): Beschaffungsstrategien für grünen Strom. Ein Leitfaden zur Beschaffung von grünem Strom für Stromabnehmer aus Industrie und Gewerbe. https://marktoffensive-ee.de/fileadmin/marktoffensive-ee/Dokumente/Abnahmeleitfaden22/dena_Marktoffensive_Abnahmeleitfaden_2022.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

DENEFF – Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz e.V., GUT Zertifizierungsgesellschaft für Managementsysteme mbH Umweltgutachter, ÖKOTEC Energiemanagement GmbH (2020) (Hrsg.): Leitfaden. Vom Energiemanagement zum Klimamanagement. Über 5 Stufen – in 14 Schritten. <https://www.gut-cert.de/service/leitfaden-klimamanagement/leitfaden-klimamanagement-gesendet>, Zugriff am: 19.12.2022.

Deutsche Umwelthilfe (2018): Das Mehrwegsystem in Deutschland. Kreislaufwirtschaft in der Praxis. https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Kreislaufwirtschaft/Mehrweg/181129_Hintergrundpapier_Mehrwegsystem-Deutschland_final.pdf, Zugriff am 19.12.2022.

European Commission (2013): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/GLS_Adopted_03_2012_0.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

European Commission (2020): A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=EN>, Zugriff am: 19.12.2022.

European Commission (2021): Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the EU ETS. https://ec.europa.eu/clima/system/files/2021-10/policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

European Commission (2022): European Climate Law. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal/european-climate-law_en, Zugriff am: 19.12.2022.

EU-Kommission (2022): Übereinkommen von Paris. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_de, Zugriff am: 19.12.2022.

FEVE European Container Glass Federation (2016): Life Cycle Assessment of Container Glass in Europe. <https://feve.org/new-life-cycle-assessment-proves-industry-success-reducing-environmental-footprint>, Zugriff am: 19.12.2022.

Fleischmann, Bernhard (2018): Neuer Ansatz zur Bilanzierung des Energieeinsatzes bei der Glasherstellung und der Versuch der geschlossenen Darstellung von Kennzahlen aus der Produktionstechnik und aus statistischen (Wirtschafts-) Daten. HVG-Mitteilungen. http://www.hvg-dgg.de/fileadmin/dateien/hvgm/2151/2173_Fleischmann_Kennzahlen.pdf, Zugriff am: 19.12.2020.

KEI – Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI) (2022): Glasindustrie. <https://www.klimaschutz-industrie.de/themen/glasindustrie/>, Zugriff am: 19.12.2022.

Kuhn, Wolf (2022): Significant CO₂ emission reduction in glass melting by advanced tank designs glasstec conference 2022, Düsseldorf.

Kuhn, Wolf; Reynolds, Andy (2017): Melting tank heating with electrical, oxy- or aero- combustion power in the light of CO₂ emission. GlassTrend - Seminar 2017, Haarlem.

Leisin, Matthias (IER) in Zusammenarbeit mit Navigant Energy Germany GmbH Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft BBG und Partner (2020): Energiewende in der Industrie. Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der Glasindustrie. Bericht an: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-glas.pdf?__blob=publicationFile&v=4, Zugriff am: 19.12.2022.

Leuthold, Sandra (2013): Merkblatt über die Besten Verfügbaren Techniken (BVT) bei der Glasherstellung. Richtlinie über Industrieemissionen 2010/75/EU (Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung).

Morris, Greg (2021): Borgonovo glass integrates ORC environmental system into manufacturing process. In: Glass International. <https://www.glass-international.com/news/borgonovo-glass-integrates-orc-environmental-system-into-manufacturing-process>, Zugriff am: 19.12.2022.

Pauksztat, Anja (2006): Ergebnisse des AiF ZUTECH Forschungsprojektes Nr. 158 Z „Referenzwerte“ für die Glasindustrie. HVG-Mitteilung Nr. 2115. http://www.hvg-dgg.de/fileadmin/dateien/hvgm/2101/2115_Pauksztat_Referenzwerte.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

Radgen, Peter (2004): Compressed Air System Audits and Benchmarking Results from the German Compressed Air Campaign “Druckluft effizient”. <https://documents.pub/document/compressed-air-benchmarking.html>, Zugriff am: 19.12.2022.

Schaeffer, Helmut A. (2020): Werkstoff Glas. Alter Werkstoff mit großer Zukunft. 2. Aufl. Berlin.

Schaeffer, Helmut A. und Langfeld, Roland (2014): Werkstoff Glas. Alter Werkstoff mit großer Zukunft. Berlin, Heidelberg: Springer, zuletzt geprüft am: 30.11.2021.

Statista (2014): Stromverbrauch für die Beleuchtung im Verarbeitenden Gewerbe nach ausgewählten Sektoren in Deutschland im Jahr 2012. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/261545/umfrage/stromverbrauch-fuer-beleuchtung-in-der-deutschen-industrie-nach-sektor/>, Zugriff am: 19.12.2022

Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE (2021): Branchenausblick 2030+: Die Glasindustrie. Berlin.

UBA – Umweltbundesamt (2013): Glas- und Mineralfaserindustrie. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriestruktur/mineralindustrie/glas-mineralfaserindustrie#struktur-der-glas-und-mineralfaserindustrie>, Zugriff am: 19.12.2022.

UBA – Umweltbundesamt (2014): Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_25_2014_nachhaltige_kaelteversorgung_in_deutschland_1.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

UBA - Umweltbundesamt (2016): CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf, Zugriff am: 19.20.2020.

UBA – Umweltbundesamt (2018): Freiwillige CO₂-Kompensationen durch Klimaschutzprojekte. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/ratgeber_freiwillige_co2_kompensation_final_internet.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

UBA – Umweltbundesamt (Dezember 2019, aktualisierte Version vom 30.03.2020): Energiemanagementsysteme in der Praxis. Vom Energieaudit zum Managementsystem nach ISO 50001: Leitfaden für Unternehmen und Organisationen. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_04_07_energiemanagementsysteme_bf.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

UBA – Umweltbundesamt (2022a): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-04-13_cc_15-2022_strommix_2022_fin_bf.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

UBA – Umweltbundesamt (2022b): Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotenziale in der Glas- und Mineralfaserindustrie. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_45-2022_prozesskettenorientierte_ermittlung_der_material-_und_energieeffizienzpotenziale_in_der_glas-_und_mineralfaserindustrie.pdf, Zugriff am: 19.12.2022.

VDMA (2014): Technische Regel 15390-1:2014-12. Beuth Verlag, Berlin.

WEKA (2022): ISO 50006: Leitfaden zu Energieleistungskennzahlen. <https://www.weka.de/energie/iso-50006/>, Zugriff am: 19.07.2022.

Zier, Michael; Stenzel, Peter; Kozur, Leander; Stolten, Detlef (2021): A review of decarbonization options for the glass industry. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174521000088?via%3Dihub>, Zugriff am: 19.12.2022.

Abkürzungen

BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle	GWP	Global Warming Potential
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz	H₂O	Wasser
BesAR	Besondere Ausgleichsregelung	IES	International Efficiency of Systems
BEW	Bundesförderung für effiziente Wärmenetze	JAZ	Jahresarbeitszahl
CCS	Carbon Capture and Storage	KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
CO₂	Kohlenstoffdioxid	KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
COP	Coefficient of Performance	KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
CSR	Corporate Social Responsibility	NaOH	Natriumhydroxid
EER	Energy Efficiency Ratio	NO_x	Stickoxide
EEW	Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft	ORC	Organic Rankine Cycle
EnB	Energy Baselines	PCF	Product Carbon Footprint
EnMS	Energy Management System	PPA	Power Purchase Agreement
EnPI	Energy Performance Indicators	RED II	Renewable Energy Directive (Erneuerbare-Energien-Richtlinie)
ETS/ EU-ETS	Europäischer Emissionshandel	SEU	Significant Energy Use
EZH	Elektrische Zusatzheizung	THG	Treibhausgas
GHG	Greenhouse Gas Protocol	UBA	Umweltbundesamt

Einheiten- und Indexverzeichnis

a	Jahr
°C	Grad Celsius
CO₂e	CO ₂ -Äquivalent
ct	Cent
d	day
€	Euro
g	Gramm
GJ	Gigajoule
GW	Gigawatt
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
m²	Quadratmeter
m³	Kubikmeter
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
Nm³	Normkubikmeter
PJ	Petajoule
t	Tonne
th	thermisch
tpd	tons per day (Tonnen pro Tag)
TWh	Terawattstunde

Checkliste	Seite	Erledigt	Prüfen	irrelevant
Systematisch Energie sparen				
Auf- und Ausbau eines zertifizierten Energiemanagementsystems (EnMS)	S. 11 ff.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Installation einer Softwarelösung zur Implementierung, Aufrechterhaltung und Verbesserung des EnMS	S. 12	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Festlegung wissenschaftlich basierter Klimaschutzziele und Aufbau eines systematischen Klimamanagements	S. 12 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beteiligung an Kooperationen wie der „Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke“	S. 13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ermittlung der Klimawirkung der Produkte (Product Carbon Footprint) und Untersuchung von Ansätzen zur Optimierung der Produktgestaltung	S. 16 ff	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gegebenenfalls freiwillige CO ₂ -Kompensation durch Klimaschutzprojekte	S. 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Auf- und Ausbau eigener Erzeugungskapazitäten (erneuerbarer Energien und Abwärmeverstromung)	S. 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beteiligung an Erzeugungsanlagen und Abschluss langfristiger Verträge zur Direktstromlieferung (PPA)	S. 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verbesserung der Datenverfügbarkeit (Ausbau Sensoren und Messkonzepte)	S. 15 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ermittlung der Potenziale für den Aufbau oder die Erweiterung von Digitalisierungslösungen	S. 15 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prozesstechnologien in der Produktion				
Prüfung und Optimierung der Brenntechnik	S. 33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Erhöhung des elektrischen Anteils bei hybriden Schmelzwannen	S. 35 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prüfung und Ausbau der Netzkapazitäten zur Steigerung der Elektrifizierung	S. 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beteiligung an F&E-Projekten für klimaschonende Glasschmelzprozesse	S. 58	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prüfung einer möglichen Umrüstung der bestehenden Produktion für einen Systemwechsel	S. 22 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nutzung von Abwärmequellen				
Erfassung verfügbarer Abwärmequellen und Wärmesenken	S. 43	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prüfung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit einer thermischen Kälteerzeugung	S. 44	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prüfung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit einer Abwärmeverstromung	S. 46 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Entwicklung eines Konzepts zur optimierten Abwärmenutzung (z. B. mittels Pinch-Analyse)	S. 43 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prüfung der Möglichkeiten einer außerbetrieblichen Abwärmenutzung	S. 47	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Querschnittstechnologien				
Einsatz hocheffizienter elektrischer Antriebssysteme	S. 49 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Einsatz von Frequenzumrichtern bei Teillastbetrieb	S. 50 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Optimierung der Verteilnetze (Luftkanäle, Druckluftverteilung)	S. 53 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Einsatz von Speichern zur Verringerung der Schaltzyklen und zur Flexibilisierung	S. 52	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Erneuerung des Beleuchtungssystems durch (hitzebeständige) LEDs	S. 55	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Impressum

Herausgeber:

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin
T: +49 (0)30 66 777-0
F: +49 (0)30 66 777-699
info@dena.de
www.dena.de

In Kooperation mit:

Bundesverband Glasindustrie e. V.
Hansaallee 203
40549 Düsseldorf
T: +49 (0)211 902278-20
info@bvglas.de
www.bvglas.de

Autorinnen und Autoren:

Jens Jäger, Projektleitung, dena
Sophie Detsch, dena
Elisabeth Gebhard, dena
Armin Kühn, dena
Aaron Sailer, dena

Mit freundlicher Unterstützung von:

Dr. Johann Overath, Bundesverband Glasindustrie e. V.
Bernhard Fleischmann, Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V.
Dr. Wolf Kuhn, Fives

Redaktion:

Oliver Jorzik, dena

Konzeption & Gestaltung:

Heimrich & Hannot GmbH

Bildnachweise:

Titel – shutterstock.com/Anton Kurashenko S. 3 – dena/phototek, S. 3 – Bundesverband Glasindustrie e. V.,
S. 9 – shutterstock/Roman Zaiets, S. 13 – shutterstock/Ilyas Yasin Uslu, S. 22 – shutterstock/Ikonoklast
Fotografie, S. 25 – shutterstock/AKrotov, S. 40 – shutterstock/Pedal to the Stock

Stand:

05/2023

Bitte zitieren als:

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023): „Systematisch Energieeffizienz steigern und CO₂-Emissionen senken in der Glasindustrie“

Alle Rechte sind vorbehalten. Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der dena.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Die Veröffentlichung dieser Publikation erfolgt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. Die Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) unterstützt die Bundesregierung in verschiedenen Projekten zur Umsetzung der energie- und klimapolitischen Ziele im Rahmen der Energiewende.